

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKI TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**OPTIMALNA PONUDA ELEKTRANE NA BIOMASU NA
TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE**

Diplomski rad

Domagoj Ivanković

Osijek, 2018.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

Osijek, 03.09.2018

Odboru za završne i diplomske ispite**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

| | |
|---|--|
| Ime i prezime studenta: | Domagoj Ivanković |
| Studij, smjer: | Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike |
| Mat. br. studenta, godina upisa: | D 1024, 19.09.2017. |
| OIB studenta: | 47615169433 |
| Mentor: | Doc.dr.sc. Goran Knežević |
| Sumentor: | |
| Sumentor iz tvrtke: | |
| Predsjednik Povjerenstva: | Doc.dr.sc. Krešimir Fekete |
| Član Povjerenstva: | Doc.dr.sc. Danijel Topić |
| Naslov diplomskog rada: | Optimalna ponuda elektrane na biomasu na tržištu električne energije |
| Primarna znanstvena grana rada: | Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika) |
| Zadatak diplomskog rada: | U diplomskom radu potrebno je ukratko opisati mehanizam tržišta električne energije. Uz to, potrebno je teorijski obraditi mogućnost davanja ponuda na tržištu električne energije elektrane na biomase. Nadalje, potrebno je izraditi računalni optimizacijski model elektrane na biomasu s ciljem određivanja optimalne ponude obzirom na očekivane vrijednosti cijena na tržištu. |
| Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada): | Izvrstan (5) |
| Kratko obrazloženje ocjene: | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadataka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina |
| Datum prijedloga ocjene mentora: | 03.09.2018 |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija: | Potpis: |
| | Datum: |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 17.09.2018

Ime i prezime studenta:

Domagoj Ivanković

Studij :

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike

Mat. br. studenta, godina upisa:

D 1024, 19.09.2017.

Ephorus podudaranja [%]:

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom:

Optimalna ponuda elektrane na biomasu na tržištu električne energije

izrađen pod vodstvom mentora

Doc.dr.sc. Goran Knežević

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. Uvod | 1 |
| 1.1 Zadatak diplomskog rada | 1 |
| 2. Tržište električne energije | 2 |
| 2.1 Tipovi tržišta i tržišnih ugovora | 2 |
| 2.1.1 Spot tržište | 3 |
| 2.1.2 Terminski ugovori i terminsko tržište (engl. Forward contracts and forward markets) | 3 |
| 2.1.3 Ročni ugovori i ročno tržište (engl. Future contracts and futures market | 3 |
| 2.1.4 Opcije (engl. Option) | 4 |
| 2.1.5 Ugovori za razliku (engl. Contracts for difference) | 4 |
| 2.2 Slobodno tržište električne energije | 4 |
| 2.2.1 Bilateralno trgovanje | 5 |
| 2.2.2 Pool trgovanje | 5 |
| 2.3 Utvrđivanje cijena na tržištu električne energije | 6 |
| 2.3.1 Utvrđivanje cijene na osnovu marginalnih troškova | 6 |
| 2.3.2 Tržišno utvrđivanje cijena | 7 |
| 3. Elektrana na biomasu | 10 |
| 3.1 Troškovi | 12 |
| 3.1.1 Cijena sirovine | 12 |
| 3.1.2 Troškovi rada i održavanja elektrane | 13 |
| 3.1.3 LCOE troškovi | 14 |
| 3.2 Sustavi poticaja | 15 |
| 3.2.1 Zajamčene tarife (engl. feed-In tariffs) | 15 |
| 3.2.2 Zajamčena premija (engl. feed-in premium) | 16 |
| 4. Matematički model sustava | 19 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Realizacija matematičkog modela | 19 |
| 4.2.Ograničenja matematičkog modela..... | 20 |
| 4.2.1. Troškovi pokretanja | 20 |
| 4.2.2. Ograničenja ravnoteže pogonsog goriva..... | 22 |
| 4.2.3. Dodatna ograničenja | 24 |
| 5. Simulacija modela | 26 |
| 5.1 Primjer proizvodnog sustava | 26 |
| 5.2 Simulacija bez poticaja i bilateralnog ugovora..... | 29 |
| 5.3 Sumulacija s bilateralnim ugovorom i bez poticaja..... | 33 |
| 5.4 Simulacija s bilateralnim ugovorom i zajamčenom premijom..... | 37 |
| 6. Zaključak..... | 42 |
| Literatura..... | 43 |
| Životopis | 44 |
| Sažetak..... | 45 |
| ABSTRACT..... | 45 |
| Prilog | 46 |

1.Uvod

U ovom radu prikazana je osnovna problematika ekonomske optimizacije pri sudjelovanju na tržištu električne energije koje se odvija dan u naprijed. Opisan je cjelokupan oblik funkcioniranja tržišta kako bi se moglo kreirati okruženje s ciljem rješavanja problema.

Za potrebe rješavanja problematike ovog rada, odnosno procesa ekonomske analize proizvodnog sustava i određivanja optimalne ponude, definiran je matematički model, koji je potom prebačen u računalni oblik s ciljem provedbe računalne simulacije.

U drugom poglavlju opisano je tržište električne energije i svi elementi vezani uz tržište. U trećem poglavlju opisana je elektrana na biomasu. Također su opisani i troškovi vezani uz elektrane, te poticajne mjere koji se daju za tu vrstu elektrana. U četvrtom poglavlju definiran je matematički model, te ograničenja koja su vezana uz taj model. U petom poglavlju dani su podaci vezani uz simulaciju, te opisuje provođenje simulacije. Tu je prikazana i analiza rezultata simulacije.

1.1 Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je ukratko opisati mehanizam tržišta električne energije. Uz to, potrebno je teorijski obraditi mogućnost davanja ponuda na tržištu električne energije elektrane na biomase. Nadalje, potrebno je izraditi računalni optimizacijski model elektrane na biomasu s ciljem određivanja optimalne ponude obzirom na očekivane vrijednosti cijena na tržištu.

2. Tržište električne energije

Tržište električne energije u posljednje vrijeme privlači sve više pažnje. Elektroprivreda ima značajnu ulogu u nacionalnoj ekonomiji svake države. Elektroenergetski sektor je jedan veoma kompleksan sustav jer se sastoji od više djelatnosti koji moraju biti usklađene kako bi isporuka električne energije do krajnjeg kupca bila sigurna i pouzdana.[1]

Energetska djelatnost dijeli se na :

- Proizvodnju električne energije
- Prijenos električne energije
- Distribucija
- Organiziranje tržišta električnom energijom
- Opskrba
- Trgovina električnom energijom [2]

Liberalizacijom tržišta u Europi kreirao se jedinstveni elektroenergetski sustav. Povećala se efikasnost, a cijena električne energije se smanjila. U početku je elektroenergetski sustav bio vertikalno organiziran koji je bio u državnom vlasništvu te je imao monopol.

2.1 Tipovi tržišta i tržišnih ugovora

Iako se tržište tretira kao mehanizam za usklađivanje ponude i potražnje za robom, treba analizirati i kako tržište može djelovati te kako različite vrste tržišta služe u različite svrhe. Osim potrebe dogovora o kvaliteti, cijeni i količini robe kupac i prodavač moraju se dogovoriti i oko:

- Datuma isporuke robe
- Način plaćanja
- Svih uvjeta koji mogu biti povezani s ovom transakcijom.

Način rješavanja navedenih dogovora rješavaju se vrstom ugovora koji sklapaju kupac i prodavač, a time se određuje i vrsta tržišta na kojem sudjeluju.[1]

2.1.1 Spot tržište

Trgovina se odvija u realnom vremenu, ovo tržište još se naziva promptno ili tekuće. Kod spot tržišta roba se dostavlja odmah nakon trgovanja. Kod spot tržišta električnom energijom podrazumijeva se:

- Tržište za dan unaprijed - u ovom slučaju električna energija se dostavlja dan nakon trgovine.
- Tržište za sat unaprijed - dostava električne energije je sat vremena nakon trgovine
- Tržište u stvarnom vremenu - tu spada tržište pomoćnim uslugama.

Kod ove vrste tržišta cijena električne energije ujedno predstavlja i stvarnu cijenu električne energije u trenutku kupnje. Nedostatak ove vrste tržišta je to što je cijena električne energije jako promjenjiva i nepredvidiva, što predstavlja rizik u poslovanju koji se nastoji izbjeći.[3]

2.1.2 Terminski ugovori i terminsko tržište (engl. Forward contracts and forward markets)

Obje strane izračunavaju koja cijena bi se mogla postići na dan isporuke, prilikom proračuna uzimaju se u obzir svi podaci koji utječu na cijenu. Zbog toga što su te informacije javno dostupne svima u svakome trenutku, cijene kupca i prodavača se obično ne razlikuju puno. Cijena koja se dogovori može se značajnije razlikovati od izračunate zbog razlika u pregovaračkim pozicijama. Kod ove vrste tržišta tržišni sudionici dijele rizik promjenjive cijene na trenutnom tržištu. Budući da su dogovori oko cijene skupi i iziskuju puno vremena, često se koriste ugovori kod kojih su standardizirani uvijete i opće odrednice.[1]

2.1.3 Ročni ugovori i ročno tržište (engl. Future contracts and futures market)

Sekundarno tržište gdje se obavlja prodaja i kupnja standardiziranih terminskih ugovora pomaže da sudionici upravljaju promjenama cijene na spot tržištu. Sudionici na ovom tržištu nužno ne moraju biti samo proizvođači i kupci, takva vrsta nije u mogućnosti izvršiti fizičku razmjenu robe. Takvi sudionici su špekulanti koji kupuju ugovore i nadaju se da će ih kasnije moći prodati po većoj cijeni, također oni mogu odmah prodati ugovor i nadati se da će ga kasnije kupiti po još nižoj cijeni. Kako se približava dan isporuke, špekulanti moraju uravnotežiti svoj položaj, jer oni ne mogu proizvesti, potrošiti ili pohraniti robu. [1]

2.1.4 Opcije (engl. Option)

U nekim slučajevima se mogu koristiti i ugovori s uvjetnom isporukom, takvi ugovori se ostvaruju samo ako nositelj ugovora odluči da je u njegovom interesu da se to ostvari. Ova vrsta ugovora dolazi u dvije vrste:

- Call opcija - ona daje pravo nositelju opcije na kupnju određene količine, a cijena po kojoj se kupuje naziva se cijena izvođenja.
- Put opcija - ona daje pravo vlasniku prodati određenu količinu po cijeni izvođenja.

Europska opcija može se iskoristiti samo na datum isteka, dok se američka opcija može iskoristiti u bilo kojem trenutku do isteka roka valjanosti. Prodavatelj opcija prima nepovratnu naknadu od nositelja opcije.[1]

2.1.5 Ugovori za razliku (engl. Contracts for difference)

U nekim slučajevima je obavezno sudjelovati na centraliziranom tržištu. U tim slučajevima nije dopušteno sklapati bilateralne sporazume, te se tada koriste ugovori za razliku koji djeluju usporedno s centraliziranim tržištem. Kod takve vrste ugovora stranke se dogovore oko cijene i količine robe, te zatim sudjeluju na centraliziranom tržištu. U trenutku završetka trgovanja na centraliziranom tržištu ugovori o razlici se obračunavaju: [1]

- U slučaju da je cijena dogovorena ugovorom veća od centralizirane tržišne cijene, kupac plaća prodavatelju razliku između cijena
- U slučaju da je cijena dogovorena ugovorom manja od tržišne cijene, prodavatelj plaća kupcu razliku između cijena

2.2 Slobodno tržište električne energije

Slobodno tržište električne energije može se organizirati na dva načina:

- Bilateralno tržište
- Pool tržište

2.2.1 Bilateralno trgovanje

Ovo trgovanje uključuje samo dvije strane, a to su kupac i prodavač. Kupac i prodavač sklapaju ugovor bez angažmana treće strane. Ovisno o raspoloživom vremenu i količinama kojima se trguje postoje različiti oblici bilateralnog tržišta: [1]

- Dugoročni bilateralni ugovori
- OTC trgovanje (engl. „Over the counter“)

2.2.1.1 Dugoročni bilateralni ugovori

Kod ovakvih ugovora uvjeti su fleksibilni i individualni, jer se pregovori odvijaju između dviju strana, kako bi se zadovoljili potrebe i ciljevi obje strane. Kod njih je većinom uključena prodaja većih količina električne energije (nekoliko stotina ili tisuća MW), na duža vremenska razdoblja. Zbog velikih troškova transakcija koji su povezani s pregovorima oko takvih ugovora, čini ih isplativim tek kada zainteresirane stranke žele prodati ili kupiti veću količinu električne energije [1]

2.1.1.2 OTC trgovanje (engl. „Over the counter“)

Ova vrsta ugovora podrazumijeva manju količinu električne energije koja će biti isporučena prema standardnom profilu. Standardizirano je koliko električne energije treba biti isporučeno tijekom različitog razdoblja dana i tjedna. Kod ove vrste trgovanja imamo znatni niže troškove transakcije, koriste ih i proizvođači i potrošači kako bi poboljšali svoj položaj kad se vrijeme isporuke približava. [1]

2.2.2 Pool trgovanje

Kod pool tržišta glavna karakteristika je to što se „čišćenje“ tržišta obavlja na osnovu optimizacijskog procesa, u obzir se uzima fizička ograničenja proizvodnje i ograničenja prijenosnog sustava. Operator koji upravlja pool-om prikuplja ponude i određuje tržišnu cijenu, ujedno provodi i optimizaciju sustava. Ako dođe do zagušenja u prijenosnom sustavu na pool tržištu dolazi do pomicanja funkcije proizvodnje, a ujedno i do različitih tržišnih cijena. Razlog pomicanja funkcije proizvodnje je to što prilikom zagušenja onemogućen prijenos električne energije iz jeftinih elektrana, i u tom slučaju se angažiraju u skuplje jedinice. [3]

2.3 Utvrđivanje cijena na tržištu električne energije

2.3.1 Utvrđivanje cijene na osnovu marginalnih troškova

Marginalni troškovi su troškovi dodatne proizvodnje, predstavlja troškove koje stvaraju novi proizvodni kapaciteti koji služe za podmirivanje dodatnih potražnja za električnom energijom. Kada se promatraju marginalni troškovi kod električne treba se analizirati struktura marginalnih troškova, što je dosta kompleksno.

Pri porastu potražnje za električnom energijom marginalni troškovi se promatraju kao troškovi prijevremene potrebe za povećanjem raspoloživih kapaciteta, odnosno predstavlja odnos rasta troškova zbog porasta potrošnje. Ova vrsta troškova može se podijeliti na: [4]

- Varijabilne troškove
- Investicijske troškove

Prilikom povećanja potrošnje dva su moguća rješenja. Prvi da je da se izgradi dodatna proizvodna jedinica koja bi zadovoljila potražnju. Marginalni troškovi u tom slučaju su jednaki troškovima instalacije u prvoj godini uvećanih za troškove goriva tijekom godine. Ova vrsta marginalnih troškova poznata je kao dugoročni marginalni troškovi, odnosno troškovi koji su nastali kada proizvođač povećava proizvodni kapacitet.

Ako ne postoji mogućnost izgradnje dodatnog proizvodnog kapaciteta tada su marginalni troškovi jednaki troškovima za gorivo u postojećim kapacitetima koji će nadoknaditi to povećanje potrošnje. U vremenu kada je potrošnja veća od raspoložive proizvodnje dodatna proizvodnja se ostvaruje po principu troškova koje izazivaju prestanak isporuke novom korisniku. Ova vrsta troškova se definira kao troškovi nestašice prouzrokovanim dodatnim zahtjevima sa proizvodnjom. Kratkotrajni troškovi se definiraju kao suma troškova za gorivo i troškova nestašice tijekom godine.

Uspoređivanjem dugoročnih i kratkotrajnih marginalnih troškova dolazi se do optimalne veličine proizvodnih kapaciteta. Da bi se postigao ekonomski optimum treba se uspostaviti ravnoteža između precijenjenosti i podcijenjenosti proizvodnih kapaciteta. To je teško procijeniti, te ravnotežna točka predstavlja minimalne troškove koje će proizvođač imati. Ravnotežna točka predstavlja minimalne troškove koji se dobiju kad se u obzir uzmu troškovi elektroprivrede i štete koje nastaju zbog nestanka električne energije.[4]

Uspostavom ravnoteže između dugoročnih i kratkoročnih marginalnih troškova ima određene prednosti. Kad su cijene i odnosi između cijena međusobno dugoročno narušeni zbog raznih državnih poticajima potrebna je efikasna metoda da se ti odnosi poprave. Ovakav pristup je jako bitan kada dolazi do promjene strukture u proizvodnji električne energije. Tada je bitno da se odmah krene s dugoročnim marginalnim troškovima, jer u protivnom potrošači ne bi imali stabilne cjenovne odnose.

Nedostaci primjene ove metode je cijena jer se definirana na osnovu marginalnih troškova i ne predstavlja konačnu cijenu za krajnjeg korisnika. U praksi je do konačne cijene teško doći, problem je i to što se pojedini troškovi ne uzimaju podjednako u obzir. U praksi je potrebno stalno razmišljati o razvoju. Cijena mora biti poznata i nekoliko godina unaprijed, ali marginalni troškovi na osnovu kojih se utvrđuje cijena su promjenjivi i pod utjecajem su slučajnih i nepredvidivih događaja.

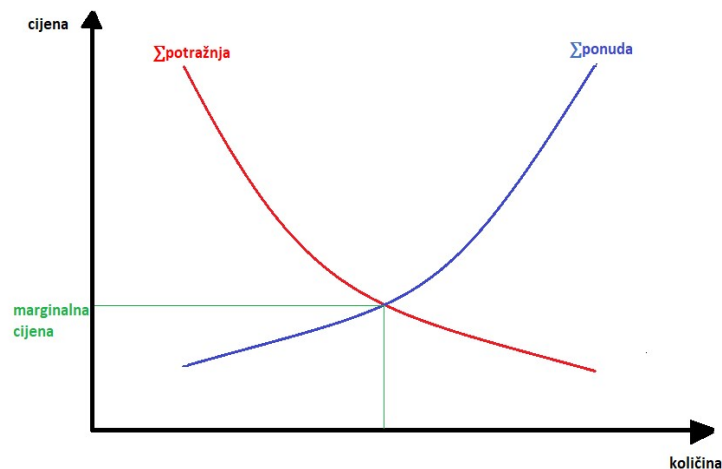
2.3.2 Tržišno utvrđivanje cijena

Tržišno utvrđivanje cijena temelji se na djelovanju tržišnog zakona, postoji jedno centralno mjesto (burza) na kojem se utvrđuje cijena električne energije.[4]

Na burzi električne energije može se kupovati:

- Dan unaprijed
- Unutardnevno

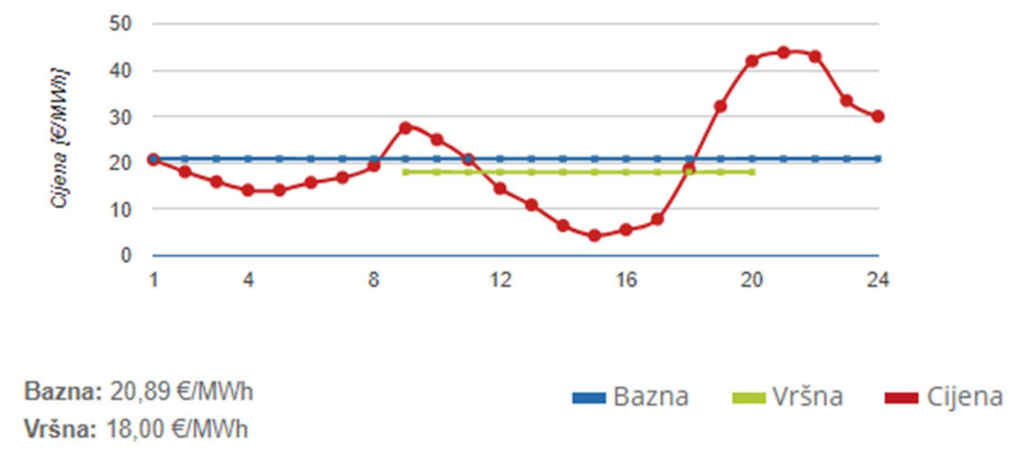
Na burzi se cijena određuje presijecanjem funkcija proizvodnje i potrošnje. Funkcija proizvodnje dobije se slaganjem ponuda od one koja ima najmanju cijenu, pa prema onoj s najvećom cijenom. Funkcija potražnje dobije se na obrnuti način.(slika 1) [5]



Slika 2.1. *Određivanje tržišne cijene na burzi*

2.3.2.1 Dan unaprijed tržište

Dan u naprijed tržište predstavlja osnovu za trgovanje električnom energijom. Dogovor se postiže između prodavatelja i kupca pri isporuci električne energije sljedećeg dana. Trgovanje na burzi električne energije potiče sudionike na planiranje. Kupac procjenjuje koliko mu je potrebno električne energije sljedećeg dana i koliko je spreman platiti za svaki sat tu količinu energije. Prodavač električne energije mora isplanirati koliko električne energije može ponuditi na tržištu i po kojoj cijeni za svaki sat. Trgovanje se odvija se kroz središnji sustav koji se održava svakog dana, izračun se provodi pravilom jedinstvene cijene. Kupci i prodavatelji predaju naloge za kupnju i prodaju električne energije, i na osnovu toga se formiraju krivulje sumarne proizvodnje i potrošnje. Sjecište te dvije krivulje predstavlja tržišnu cijenu, te se u svakom satu obavlja trgovanje za naloge koji su prihvaćeni po jedinstvenoj cijeni [5]



Slika 2.2. Cijena električne energije za 08.04.2018.[5]

2.3.2.2 Unutardnevno tržište

Većim dijelom potrebne količine električne energije se obavlja na dan u naprijed tržištu, unutardnevno tržište služi da se osigura ravnoteža između ponude i potražnje na tržištu. Kupci i prodavatelji mogu razmjenjivati potrebnu količinu električne energije u realnom vremenu kako bi se tržište održalo u ravnoteži. U unutardnevnom tržištu transakcije se automatski uparuju kad se podudarni nalozi unesu na platformu za trgovanje. Transakciju je moguće ostvariti 30 minuta prije isporuke, a trgovanje započinje u 15:45 dan prije isporuke. Na ovoj vrsti tržišta trguje se satnim, vršnim, baznim i blok proizvodima[5]

3. Elektrana na biomasu

Razvojem elektrana na biomasu dolazi se do sve većih prednosti korištenja ove vrste elektrana u odnosu na elektrane koja za svoj rad koriste fosilna goriva. Njihovom upotrebom dolazi do smanjenja emisije stakleničkih plinova, uštede troškova, poboljšava se sigurnost opskrbe, te dolazi do smanjenja zbrinjavanja otpada. Mogućnost realizacije i isplativosti elektrana na biomasu ovisi o izvoru i prirodi sirovine.

Prilikom analize razmatraju se tri ključne komponente:

- Sirovina za biomasu: Dolaze u različitim oblicima i imaju različita svojstva
- Pretvorba biomase: Proces prilikom kojeg se sirovina pretvara u energiju koja će se koristiti prilikom proizvodnje električne energije.
- Tehnologija proizvodnje energije: Danas su u potrebi različite tehnologije koje koriste biomasu kao svoje gorivo.

Izvor biomase glavni je faktor za ekonomski uspjeh elektrane na biomasu. Kao sirovina za biomasu koristi se široki spektar sirovina, možemo ih podijeliti na ruralne i urbane. (tablica 1)

Tablica 3.1. *Sirovina za biomasu*

| Ruralna | Urbana |
|---|--------------------------------------|
| Ostaci šume i drvni otpad | Urbani drvni otpad (kutije, palete) |
| Poljoprivredni ostaci (kukuruz, slama) | Bioplin otpadnih voda i kanalizacije |
| Energetski usjevi(trave ili stabla) | Deponijski plin |
| Bioplin iz otpadnih voda stoke | Komunalni kruti otpad |

Osnovni problemi kod sirovine je sadržaj energije, pepela, vlažnosti, kao i homogenosti. Ovi faktori utječu na trošak sirovine po jedinici energije, transport, pred tretman, skladištenje te na odabir tehnologije pretvorbe.

Osnovne tehnologije pretvorbe su:

- Toplinsko-kemijski proces (sagorijevanje, piroliza i rasplinjavanje)
- Biokemijski proces (anaerobna digestija)

Električna energija se može proizvesti iz različitih sirovina i uporabom različitih tehnologija. Danas su u upotrebi tehnologije koje su već komercionalno dokazane s širokim spektrom izbora proizvođača, pa sve do onih kojih su još u postupcima testiranja.

Tehnologija direktnog izgaranja biomase upotrebljava se za proizvodnju od nekoliko MW do 100MW ili više, ova tehnologija ujedno je i najrašireniji oblik proizvodnje energije iz biomase. Kod njih najveći utjecaj na isplativost ima dostupnost i troškovi sirovine.



Slika 3.1. *Elektrana na poljoprivredne ostatke*

Anaerobna digestija pretvara sirovinu biomase s relativno velikim udjelom vlage u bioplin. Anaerobna digestija koristi se kao kontinuirani proces pa je potrebna stalna opskrba sirovinom. Sirovina koja se koristi mora biti provjeren i u većini slučajeva zahtjeva prethodnu obradu, da bi

se povećala proizvodnja metana. Glavni proizvodi anaerobne digestije su bioplin i digestat (ostatak). [6]

3.1 Troškovi

3.1.1 Cijena sirovine

Za razliku od ostalih tipova obnovljivih izvora energije, biomasa zahtjeva sirovinu koja mora biti proizvedena, sakupljena, transportirana i pohranjena. Ekonomičnost proizvodnje električne energije ovisi o dostupnosti i dugoročne ponude sirovine koja je potrebna. Kod biomase troškovi sirovine mogu dosegnuti i 40% do 50% troškova proizvedene električne energije. Poljoprivredni ostaci imaju najmanji trošak jer su to otpadci koji se skupljaju nakon žetve. [6]

Tablica 3.2. *Troškovi sirovine [6]*

| | Tipičan udio vlage | Toplinska vrijednost MJ/kg | Cijena USD/GJ | Cijena USD/t |
|------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------|--------------|
| Šumski ostaci | 30%-40% | 11,5 | 1,30-2,61 | 15-30 |
| Drvni otpad | 5%-15% | 19,9 | 0,5-2,51 | 10-50 |
| Poljoprivredni otpaci | 20%-35% | 11,35-11,55 | 1,73-4,33 | 20-50 |
| Energetski usjevi | 10%-30% | 14,25-18,25 | 14,25-18,25 | 4,51-6,94 |
| Deponijski plin | | 18,6-29,8 | 0,94-2,84 | 0,017-0,051 |

Za šumske ostatke dominantni troškovi su transport i sakupljanje. Gustoća šumskih potencijala ima utjecaj na radijus prometa koji je potreban da se ostvari zadani energetski potencijal postrojenja. U slučaju niske gustoće šumskih potencijala ograničena je ekonomska isplativost transporta sirovine, elektrana ne može ekonomično proizvesti električnu energije jer nema dostupne jeftine sirovine.

Cijena sirovine za biomasu variraju i nemaju nekakvu fiksnu cijenu. Cijena ovisi o energetskoj vrijednosti, sadržaju vlage i ostalim svojstvima o kojima ovise troškovi i koji imaju utjecaj na učinkovitost proizvodnje. Najveća količina sirovine se dobiva iz šumskih ostataka, značajan udio

imaju i kukuruzna silaža, a cijena se kreće od 55 USD/t pa na više. Na tu cijenu navise utjecaja ima raspoloživost usjeva i klimatske prilike.

Na troškove sirovine utjecaj ima i potreba priprema sirovine prije nego što se upotrijebi za proizvodnju električne energije. Ovisno o vrsti sirovine postoje značajne ekonomske razlike u pripremi sirovine. Kapitalni troškovi pripreme mogu biti od 6% do 20% ukupnih troškova kod postrojenja koji prerađuju više od 550 tona dnevno.

Sustavi anaerobne digestije iskorištavaju otpadne vode i otpadne tvari pa su pogodne za ruralna područja. Pogodni su za farme s 500 ili više krava, farme s najmanje 2000 svinja ili gdje se gnoj skuplja i pohranjuje u tekućem, gnojnici i polukrutom stanju.

Kod deponijskog plina trošak sirovine je amortizirani trošak ulaganja u sustav za prikupljanja plina. Troškovi vezani za skupljanje plina i rasplinjače kreću se od 0,9 do 2,8 USD/GJ. Deponijski plin ima mal udio energije od 18 do 28 MJ/m³ i potrebni su značajni volumeni za proizvodnju korisnog plina. Učinkovitost se povećava s iskorištavanjem toplinske energije.

3.1.2 Troškovi rada i održavanja elektrane

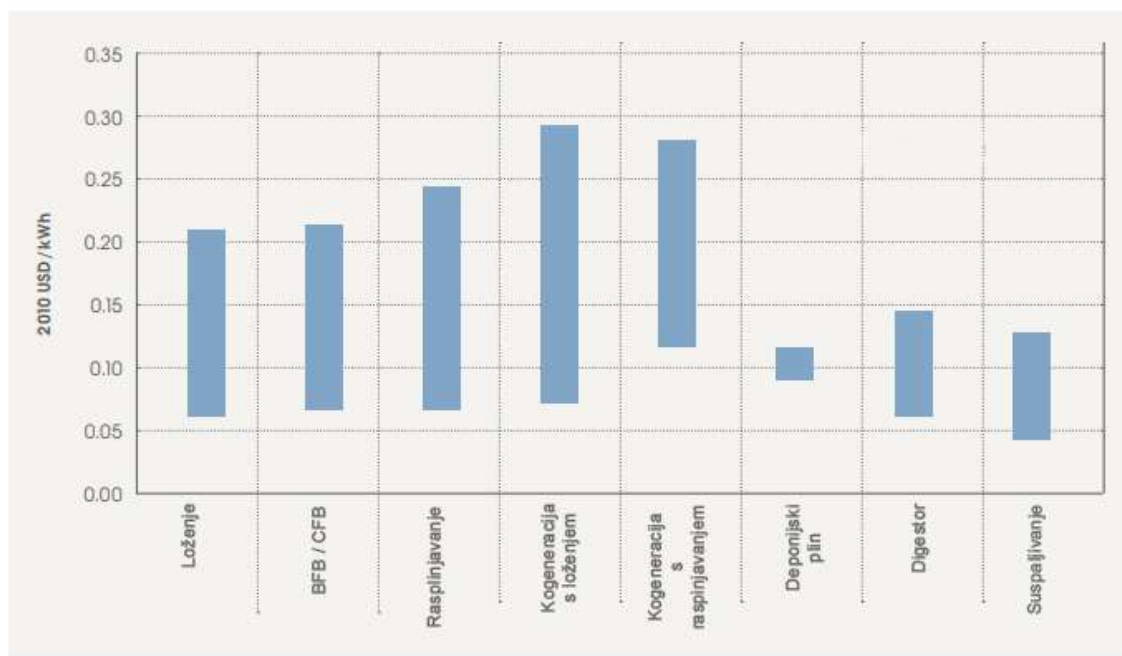
Ova vrsta troškova odnosi se na fiksne i varijabilne troškove. Fiksni troškovi operative i održavanje izražavaju se u postotku kapitalnih troškova i kreće se od 1% do 6%, u te troškove spada: rad, zakazano održavanje, rutinske zamijene opreme, osiguranje, itd. Što je postrojenje veće, nižu su specifični troškovi po kW. Varijabilni troškovi ovise o izlazu iz sustava i izražavaju se u USD/kWh. U varijabilne troškove spada gorivo, uklanjanje pepela, neplanirana održavanja, zamjena operem itd. [6]

Tablica 3.3. *Troškovi rada i održavanja [6]*

| Tehnologija | Fiksni troškovi | Varijabilni troškovi |
|-------------------|------------------|----------------------|
| Loženje /BFB/ CFC | 3,2-4,2 3-6 | 3,8- 4,7 |
| Rasplinjavanje | 3 6 | 3,7 |
| AD sistem | 2,1-3,2 2,3-7 | 4.2 |
| Deponijski plin | 11-20 | |

3.1.3 LCOE troškovi

Širok raspon tehnologije za proizvodnju električne energije iz biomase i troškovi sirovine za rezultat ima širok raspon LCOE proizvodnje električne energije iz biomase i za pojedine tehnologije raspon može biti širok zbog različite konfiguracije i sirovine. Ako pretpostavimo da je kapitalni trošak 10% LCOE proizvodnje električne energije iz biomase kreće se 0,06 USD/kWh pa do 0,2 USD/kWh.



Slika 3.2. LCOE za različite tehnologije

U slučaju da su kapitalni troškovi niski i niska cijena sirovine zbog dostupnosti električna energije iz biomase može biti konkurentna s LCOE od oko 0,06 USD/kWh, s povećanjem kapitalnih troškova i većom cijenom sirovine proizvedena cijena električne energije neće moći biti konkurentna bez državnih subvencija. Zbog toga se najviše iskorištavaju šumski ili poljoprivredni ostaci i otpad jer su cijene sirovine niske, sirovina je dostupna i niski su kapitalni troškovi.

Ako s dostupni nisko cjenovni ložeći kotlovi tada su i troškovi za gorivo niski, ti kotlovi koji stvaraju vodenu paru za napajanje parnih turbina nude konkurentnu električnu energiju s LCOE od 0,062 USD/kWh, no u slučaju velikih kapitalnih troškova i ako su se za loženje kotla koriste uvezene pelete LCOE se kreće oko 0,21 USD/kWh. Izgaranje u fluidiziranom sloju (CFB i BFB) ima veći raspon LCEO zbog viših kapitalnih troškova.

Kod rasplinjavanja LCOE je u vrlo širokom rasponom, zbog troškova sirovina, ali i zbog činjenice da je to već dokazana tehnologija koja je jeftinija od ostalih tehnologija. LCOE se kreće

od 0,065 USD/kWh kod fiksnih postrojenja do 0,24 USD/kWh za mala postrojenja s motorom s unutarnjim izgaranjem kao pokretačem, koji je pogodan za male mreže.

Kogeneracija (CHP) je znatno skuplja od ostalih tehnologija, ali ima veću učinkovitost. Kod njih se LCOE kreće u rasponu od 0,072 do 0,29 USD/kWh, tu je uključeno i proizvodnja topline. Sustavi kogeneracije s rasplinjavanjem ima raspon LCOE od 0,12 do 0,28 USD/kWh zbog većih kapitalnih troškova.

Deponijski plin, anaerobna digestija i tehnologija suspaljivanja ima uži raspon troškova. Kod anaerobne digestije raspon kapitalnih troškova je uzak, ali cijena sirovine može znatno varirati od besplatne za stajski gnoj ili kanalizacijske otpadne vode, pa do 40 USD/t za poljoprivredne usjeve. Kod tehnologije suspaljivanja LCOE trošak kreće se od 0,044 do 0,13 USD/kWh. [6]

3.2 Sustavi poticaja

3.2.1 Zajamčene tarife (engl. feed-In tariffs)

Ova vrsta poticaja namijenjena je za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije. Taj model poticaja je uveden kako bi se povećala proizvodnja električne energije iz obnovljiv izvora. Proizvođači predaju električnu energiju distributeru po unaprijed dogovorenoj fiksnoj tarifi na određeno vremensko razdoblje. [7]

Ova vrsta tarife daje tri vrste prednosti:

- Plaćanje za svu električnu energiju koja se proizvede, čak i za vlastitu potrošnju
- Dodatni bonus za električnu energiju koja se predaje u mrežu
- Smanjenje vlastitog računa za električnu energiju

Zajamčena tarifa u Njemačkoj

Da bi postrojenje dobilo ovu vrstu poticaja mora zadovoljiti kriterij: da se 60% proizvedene topline iskoristi ili da se električna energija prodaje izravno. Udio uporabe kukuruza i zrna ne smije biti viši od 60% prilikom proizvodnje električne energije. Početna osnovna tarifa godišnje se smanjuje za 2 posto, dok se tarifa za gorivo ne mijenja.

U tablici 3.4 su prikazane cijene zajamčenih tarifa u Njemačkoj, dok su u tablici 3.5 za usporedbu prikazane cijene zajamčenih tarifa u Luxemburgu.

Tablica 3.4. *Zajamčene tarife u Njemačkoj [8]*

| Bioplin | | Biomasa |
|-----------------------------|-------------|-------------------|
| Cijena €ct/kWh | | Cijena €ct/kWh |
| Bioplin iz biološkog otpada | 13,05-14,88 | 5,71-13,32 |
| Bioplin iz stajskog gnoja | 23,14 | |
| Deponijski plin | 5,66-8,17 | |
| Kanalizacijski plin | 5,66-6,99 | |

Tablica 3.5. *Zajamčene tarife u Luxembourg[8]*

| Bioplin | | Biomasa | |
|-------------|-------------------|----------|-------------------|
| Snaga | Cijena €ct/kWh | Snaga | Cijena €ct/kWh |
| <150kW | 19,1 | <1MW | 16,2 |
| 150kW-300kW | 18 | | |
| 300kW-500kW | 17 | | |
| 500kW-2,5MW | 15,2 | 1MW-10MW | 14,2 |

3.2.2 Zajamčena premija (engl. feed-in premium)

Električna energija koja se proizvede u obnovljivim izvorima u većini slučajeva prodaje se na tržištu električne energije, pri tome proizvođači primaju premije koje su veće od tržišne cijene proizvodnje električne energije. Ova premija može biti fiksna ili klizna.

Kod fiksnih premija postoji velika mogućnost od prekomjerne nadoknade zbog velike tržišne cijene ili nedovoljne naknade uslijed niskih tržišnih cijena. Da bi se to izbjeglo kombinira se s unaprijed određenim minimalnim ili maksimalnim razinama.

Klizna premija dobije se kontinuiranim izračunom razlika između tržišnih cijena (obično je to prosjek tijekom određenog vremenskog razdoblja) i unaprijed definirane referentne tarife. U slučaju da su tržišne cijene više od referentne tarife ne isplaćuje se premija.

Premija se ponekada razlikuje od tehnologije do tehnologije, veličine i lokacije. Postoji mogućnost isplate dodatnih bonusa, također isplaćuju se bonusi i za upravljanje kako bi se riješili dodatni troškovi koji se odnose na prodaju električne energije na spot tržištu. Ovom premijom se potiče proizvođače da proizvode električnu energiju kada je potražnja visoka ili proizvodnja u drugim izvorima je niska. [9]

Zajamčena premija u Njemačkoj

Njemačka je 2012. godine uvela klizne premije, premije se isplaćuje na osnovu prihoda od izravne prodaje električne energije obnovljivih izvora na spot tržištu. Računa se kao razlika između referentnih vrijednosti specifičnih za tehnologiju i prosječne mjesečne referentne tržišne vrijednosti električne energije. [8]

U tablici 3.6 su prikazane cijene zajamčenih premija u Njemačkoj, dok su u tablici 3.7 za usporedbu prikazane cijene zajamčenih premija u Luxemburgu.

Tablica 3.6. *Zajamčene premije u Njemačkoj* [8]

| Bioplin | | Biomasa |
|------------------------------------|-------------|------------|
| Cijena | | Cijena |
| €ct/kWh | | €ct/kWh |
| Bioplin iz biološkog otpada | 13,05-14,88 | 5,71-13,32 |
| Bioplin iz stajskog gnoja | 23,14 | |
| Deponijski plin | 5,66-8,17 | |
| Kanalizacijski plin | 5,66-6,99 | |

Tablica 3.7. *Zajamčene premije u Luxembourggu [8]*

| Bioplin | | Biomasa | |
|-------------|-----------------|----------|-----------------|
| Snaga | Cijena €/MWh | Snaga | Cijena €/MWh |
| <150kW | 190,08 | <1MW | 161,37 |
| 150kW-300kW | 179,19 | | |
| 300kW-500kW | 169,29 | 1MW-10MW | 141,57 |
| 500kW-2,5MW | 151,47 | | |

4. Matematički model sustava

4.1 Realizacija matematičkog modela

Zadatak funkcije cilja je maksimizirati prihod prilikom prodaje električne energije koji se umanjuje za vrijednosti graničnih troškova proizvodnje i troškova pokretanja. Treba voditi računa i o proizvodnim kapacitetima elektrana, ravnoteži opterećenja i ograničenjima zbog pokretanja.

$$\text{maks.} \sum_{t=1}^{24} \left(\lambda_t (p_t - k_t) - \sum_{g=1}^n (\beta_g G_{g,t} + C_g^{''''} s_{g,t}^{''''} + C_g^{''''} s_{g,t}^{''''} + C_g^{'''} s_{g,t}^{'''} + C_g^{''} s_{g,t}^{''} + C_g' s_{g,t}' + E_g \mu_g \beta_g) \right) (4-1)$$

gdje je:

| | |
|------------------|---|
| t | - trenutni sat |
| λ_t | - cijena električne energije u t satu |
| p_t | - količina električne energije koja je prodana na tržištu u t satu |
| k_t | - količina električne energije koja je kupljena na tržištu u t satu |
| g | - oznake elektrane |
| β_g | - granični troškovi proizvodnje električne energije u g elektrani u ovisnosti o vrijednosti proizvodnje |
| $G_{g,t}$ | - proizvodnja električne energije u g elektrani u t satu |
| $C_g^{''''}$ | - troškovi pokretanja g elektrane nakon minimalno pet sati od prestanka proizvodnje |
| $s_{g,t}^{''''}$ | - pokretanje g elektrane u t satu nakon najmanje pet sati od prestanka proizvodnje |
| $C_g^{''''}$ | - troškovi pokretanja g elektrane nakon četiri sati od prestanka proizvodnje |
| $s_{g,t}^{''''}$ | - pokretanje g elektrane u t satu nakon četiri sati od prestanka proizvodnje |
| $C_g^{'''}$ | - troškovi pokretanja g elektrane nakon tri sati od prestanka proizvodnje |
| $s_{g,t}^{'''}$ | - pokretanje g elektrane u t satu nakon tri sati od prestanka proizvodnje |
| $C_g^{''}$ | - troškovi pokretanja g elektrane nakon dva sata od prestanka proizvodnje |
| $s_{g,t}^{''}$ | - pokretanje g elektrane u t satu nakon dva sati od prestanka proizvodnje |
| C_g' | - troškovi pokretanja g elektrane nakon jedan sat od prestanka proizvodnje |
| $s_{g,t}'$ | - pokretanje g elektrane u t satu nakon jedan sat od prestanka proizvodnje |
| μ_g | - proizvodni ekvivalent [MWh/ m^3] |
| E_g | - količina neiskorištenog pogonskog goriva na g generatoru |

4.2. Ograničenja matematičkog modela

Prilikom planiranja rada elektrane treba voditi računa da promjena u količini pogonskog goriva ne utječe trenutno na proizvodnju električne energije. Brzina reagiranja elektrane na tu promjenu ovisi o njezinoj veličini. Proizvodne jedinice sačinjavaju generatori koji se pokreću pomoću motora s unutarnjim izgaranjem, pa je zbog toga vremenska skala u sekundama.

4.2.1. Troškovi pokretanja

Prilikom rada elektrane zahtijeva se unos određene količine pogonskog goriva kako bi se započeo proces proizvodnje ili da bi se spriječila eventualna oštećenja elektrane, zbog toga je uz gornju granicu proizvodnje često potrebna i donja granica proizvodnje elektrane.

U slučaju kada je elektrana angažirana u određenom satu, u tom slučaju gornja granica proizvodnje jednaka je instaliranoj snazi elektrane, u suprotnome slučaju jednaka je nuli. Navedeni uvjeti se izražava kao:

$$G_{g,t} \leq u_{g,t} \cdot G_{max,g} \quad (4-2)$$

gdje je:

$G_{g,t}$ – količina električne energije koja je proizvedena u g elektrani u t satu

$u_{g,t}$ – angažiranost jedinice u g elektrani u t satu (0 ako nije angažirana, inače 1)

$G_{max,g}$ – maksimalna proizvodnja u g elektrani u t satu

Cjelobrojna binarna varijabla $u_{g,t}$ mora se uvesti kako bi odredili da li je elektrana bila angažirana tijekom određenog razdoblja. Pomoću te varijable može se predstaviti i donja granica proizvodnje električne energije:

$$G_{g,t} \geq u_{g,t} \cdot G_{min,g} \quad (4-3)$$

gdje je $G_{min,g}$ minimalna proizvodnja u g elektrani u t satu

U slučaju kad je angažirana elektrana donja granica je $G_{min,g}$, a u slučaju kada je izvan pogona donja granica je nula. U slučaju kada je $u_{g,t}$ jednako jedan, proizvodnja $G_{g,t}$ je u unutar intervala $[G_{g,t}, G_{max,g}]$, a u slučaju kada je nula, jedina mogućnost je da se postavi da je $G_{g,t}=0$.

Prilikom pokretanje elektrane stvaraju se određeni troškovi, jer dio pogonskog goriva se troši na zagrijavanje elektrane do radne temperature. Količina pogonskog goriva koja je potrebna da se zagrije ovisno o trenutnoj temperaturi. Trenutna temperatura ovisi o vremenu koliko je prošlo otkad je elektrana izvan pogona. Troškovi pokretanje predstavljaju se kao:

$$C_g'''' = \left(1 - e^{-\frac{4}{t}}\right) C_g'''' \quad (4 - 4)$$

$$C_g''' = \left(1 - e^{-\frac{3}{t}}\right) C_g'''' \quad (4 - 5)$$

$$C_g'' = \left(1 - e^{-\frac{2}{t}}\right) C_g'''' \quad (4 - 6)$$

$$C_g' = \left(1 - e^{-\frac{1}{t}}\right) C_g'''' \quad (4 - 7)$$

gdje je:

- C_g'''' -trošak pokretanje nakon minimalno pet sati izvan pogona
- C_g''' - trošak pokretanje nakon minimalno četiri sata izvan pogona
- C_g'' - trošak pokretanje nakon minimalno tri sata izvan pogona
- C_g' - trošak pokretanje nakon minimalno dva sata izvan pogona
- C_g - trošak pokretanje nakon minimalno jedan sat izvan pogona
- τ -vremenska termalna konstanta

Ako će elektrana kratko vrijeme biti izvan pogona, ponekada je isplativije ne zaustavljati izgaranje iako ne proizvodimo električnu energiju. Tada se količina pogonskog goriva održava malo iznad potrebne količine za održavanje radne temperature. Pretpostavlja se da je količina pogonskog goriva potrebna za to konstantan, čime se troškovi pokretanja proporcionalna vremenu slučaju kada je elektrana provela izvan pogona:

$$C_{pok} = C_{pohra.} \cdot t \quad (4-8)$$

Kako bi se prikazalo pokretanje pojedine elektrane nakon određenog vremena od prestanka proizvodnje koriste se pet zasebnih varijabli, stoga se moraju uvesti ograničenja da bi se osigurala točna vrijednost varijablama pokretanja:

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} - u_{g,t-2} - u_{g,t-3} - u_{g,t-4} - u_{g,t-5} - s_{g,t}'''' \quad (4 - 9)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} - u_{g,t-2} - u_{g,t-3} - u_{g,t-4} - u_{g,t-5} - s_{g,t}'''' \quad (4 - 10)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} - u_{g,t-2} - u_{g,t-3} - u_{g,t-4} - u_{g,t-5} - s_{g,t}''' \quad (4 - 11)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} - u_{g,t-2} - u_{g,t-3} - u_{g,t-4} - u_{g,t-5} - s_{g,t}'' \quad (4 - 12)$$

$$u_{g,t} - u_{g,t-1} - u_{g,t-2} - u_{g,t-3} - u_{g,t-4} - u_{g,t-5} - s_{g,t}' \quad (4 - 13)$$

4.2.2. Ograničenja ravnoteže pogonskog goriva

Kod elektrane na bioplin potrebno je dodati i ograničenje za proizvodnju plina, kako bi se jamčilo da proizvodnja plina ne premaši maksimalni volumen spremnika.

$$S_{g,t} = S_{g,t-1} + V_{g,t} - E_{g,t} - P_{g,t} - s_{g,t}' \cdot P_{start,1} - s_{g,t}'' \cdot P_{start,2} - s_{g,t}''' \cdot P_{start,3} - s_{g,t}'''' \cdot P_{start,4} - s_{g,t}''''' \cdot P_{start,5} \quad (4 - 14)$$

$$G_{g,t} = P_{g,t} \cdot \mu_g \quad (4 - 15)$$

gdje je :

- $S_{g,t}$ -količina bioplina u spremniku generatora g u satu t
- $S_{g,t-1}$ -količina bioplina u spremniku generatora g n kraju prethodnog sata
- $V_{g,t}$ -dobavljena količina bioplina u spremnik g generatora u satu t
- $E_{g,t}$ -količina plina koja je spaljena na baklji generatora g u satu t
- $P_{g,t}$ - količina biomase potrošena na generatoru g u satu t
- $s_{g,t}'$ -pokretanje g elektrane u t satu nakon jedan sat od prestanka proizvodnje
- $P_{start,1}$ -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon jednog sata od prestanka proizvodnje
- $s_{g,t}''$ -pokretanje g elektrane u t satu nakon dva sati od prestanka proizvodnje
- $P_{start,2}$ -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon dva sata od prestanka proizvodnje
- $s_{g,t}'''$ -pokretanje g elektrane u t satu nakon tri sati od prestanka proizvodnje
- $P_{start,3}$ -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon tri sata od prestanka proizvodnje

| | |
|----------------|---|
| $s_{g,t}''''$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon četiri sati od prestanka proizvodnje |
| $P_{start,4}$ | -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon četiri sata od prestanka proizvodnje |
| $s_{g,t}'''''$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon najmanje pet sati od prestanka proizvodnje |
| $P_{start,5}$ | -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon pet ili više sata od prestanka proizvodnje |

Prema izrazu 4-15 može se zaključiti da je veza između količine plina u m^3 koja je potrebna da se proizvede MWh električne energije proizvodni ekvivalent μ_g .

Za elektranu na biomasu također je potrebno dodati ograničenje. Razlika kod ovoga ograničenja u odnosu na bioplin je to što ovdje ne uzimamo u obzir količini plina spaljenu na baklji, jer kod elektrane na biomasu baklja ne postoji.

$$S_{g,t} = S_{g,t-1} + V_{g,t} - P_{g,t} - s'_{g,t} \cdot P_{start,1} - s''_{g,t} \cdot P_{start,2} - s'''_{g,t} \cdot P_{start,3} - s''''_{g,t} \cdot P_{start,4} - s'''''_{g,t} \cdot P_{start,5} \quad (4 - 16)$$

$$G_{g,t} = P_{g,t} \cdot \mu_g \quad (4 - 17)$$

gdje je :

| | |
|----------------|---|
| $S_{g,t}$ | -količina biomase u spremniku generatora g u satu t |
| $S_{g,t-1}$ | -količina biomase u spremniku generatora g n kraju prethodnog sata |
| $V_{g,t}$ | -dobavljena količina biomase u spremnik g generatora u satu t |
| $P_{g,t}$ | - količina biomase potrošena na generatoru g u satu t |
| $s'_{g,t}$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon jedan sat od prestanka proizvodnje |
| $P_{start,1}$ | -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon jednog sata od prestanka proizvodnje |
| $s''_{g,t}$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon dva sati od prestanka proizvodnje |
| $P_{start,2}$ | -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon dva sata od prestanka proizvodnje |
| $s'''_{g,t}$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon tri sati od prestanka proizvodnje |
| $P_{start,3}$ | -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon tri sata od prestanka proizvodnje |
| $s''''_{g,t}$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon četiri sati od prestanka proizvodnje |
| $P_{start,4}$ | -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon četiri sata od prestanka proizvodnje |
| $s'''''_{g,t}$ | -pokretanje g elektrane u t satu nakon najmanje pet sati od prestanka proizvodnje |

$P_{start,5}$ -količina goriva potrebnog za pokretanje nakon pet ili više sata od prestanka proizvodnje

4.2.3. Dodatna ograničenja

Ograničenja prilikom proizvodnje predstavljaju se pomoću sljedećih jednažbi:

$$G_{g,t} - u_{g,t} \cdot G_{max,g} \leq 0 \quad (4 - 18)$$

$$u_{g,t} \cdot G_{min,g} - G_{g,t} \leq 0 \quad (4 - 19)$$

Također je potrebno dodati i ograničenje ravnoteže opterećenja, kako bi se uskladilo da je proizvedena i kupljena električna energija elektrane bila jednaka vrijednosti bilateralnog ugovora zajedno s prodajom na tržištu:

$$\sum_{g=1}^n G_{g,t} + k_t = B_t + p_t \quad (4 - 20)$$

gdje je :

| | |
|-----------|--|
| $G_{g,t}$ | -proizvodnja električne energije u g elektrani u t satu |
| k_t | -električna energija koja je kupljena na tržištu u t satu |
| B_t | -električna energija prodana na tržištu s bilateralnim ugovorom u t satu |
| p_t | -električna energija prodanu na tržištu u t satu |

Potrebno je dodati i ograničenja varijabli:

$$u_{g,t} \in \{0,1\} \quad (4 - 21)$$

$$s_{g,t}'''' \in \{0,1\} \quad (4 - 22)$$

$$s_{g,t}''' \in \{0,1\} \quad (4 - 23)$$

$$s_{g,t}'' \in \{0,1\} \quad (4 - 24)$$

$$s_{g,t}' \in \{0,1\} \quad (4 - 25)$$

$$s_{g,t} \in \{0,1\} \quad (4 - 26)$$

$$0 \leq k_t \quad (4 - 27)$$

$$0 \leq p_t \quad (4 - 28)$$

$$0 \leq S_{g,t} \leq S_{g,max} \quad (4 - 29)$$

5. Simulacija modela

5.1 Primjer proizvodnog sustava

Proizvodni sustav se sastoji od jedne elektrane na biomasu te jedne elektrane na bioplin. U tablici 5.1 prikazane se karakteristike elektrana koji su korištene u simulaciji.

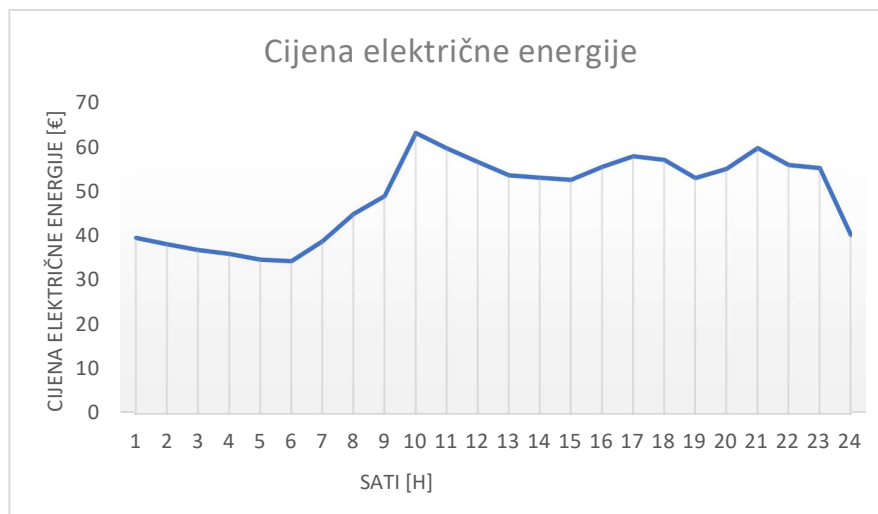
Tablica 5.1. *Karakteristike elektrana korištene u simulaciji [10][11]*

| | Bioplin | Biomasa |
|---|---------|---------|
| Instalirana snaga [MW] | 2,3 | 5 |
| Investicijski troškovi [EUR/kWh] | 2072,67 | 2911,97 |
| Troškovi održavanja i pogona [EUR/MWh] | 5 | 4,1 |
| Faktor iskoristivosti instalirane snage [%] | 83 | 90 |
| Električna učinkovitost [%] | 42 | 41 |

Za izvedbu simulacije odabrana je cijena električne energije koja je postignuta dana 04.lipnja.2018. godine na Cropex tržištu. Cijena električne energije λ_t predstavljene su grafički i tablicom.

Tablica 5.2. *Vrijednost cijene električne energije dana 04.lipnja.2018. godine [5]*

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| t [h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| λ_t [€] | 39,59 | 38,17 | 36,87 | 35,97 | 34,67 | 34,37 | 38,87 | 44,99 | 48,99 | 63,19 | 59,75 | 56,70 |
| t [h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| λ_t [€] | 53,70 | 53,15 | 52,68 | 55,59 | 57,97 | 57,15 | 53,09 | 55,08 | 59,80 | 56,00 | 55,30 | 40,30 |



Slika 5.1. Dnevni dijagram cijene električne energije

Prema izrazima (4-4), (4-5), (4-6), (4-7) izračunati su vrijednosti troškovi pokretanja za elektranu na biomasu što je vidljivo u tablici 5.3:

Tablica 5.3. Troškovi pokretanja

| | |
|-----------------|-----|
| C_g'''' [EUR] | 837 |
| C_g''' [EUR] | 723 |
| C_g'' [EUR] | 650 |
| C_g' [EUR] | 530 |
| C_g [EUR] | 330 |

Za bioplin se uzima da su troškovi pokretanju 0 jer su imamo plinski motor te je start gotovo trenutno, pa nema dodatnih troškova prilikom pokretanja.

Prema izrazima (4-4), (4-5), (4-6), (4-7) također su izračunati i količina pogonskog goriva potrebnog za pokretanje. Za bioplin se uzima vrijednost 0 jer tu imamo plinski motor te je tu start trenutni, dok je za biomasu potrebno izračunati i dobivene su sljedeće vrijednosti:

Tablica 5.4 *Potrošnja pogonskog goriva prilikom pokretanja*

| | |
|----------------------|-----|
| $P_{start,5}$ [tona] | 9 |
| $P_{start,4}$ [tona] | 7,8 |
| $P_{start,3}$ [tona] | 7 |
| $P_{start,2}$ [tona] | 5,6 |
| $P_{start,1}$ [tona] | 3,5 |

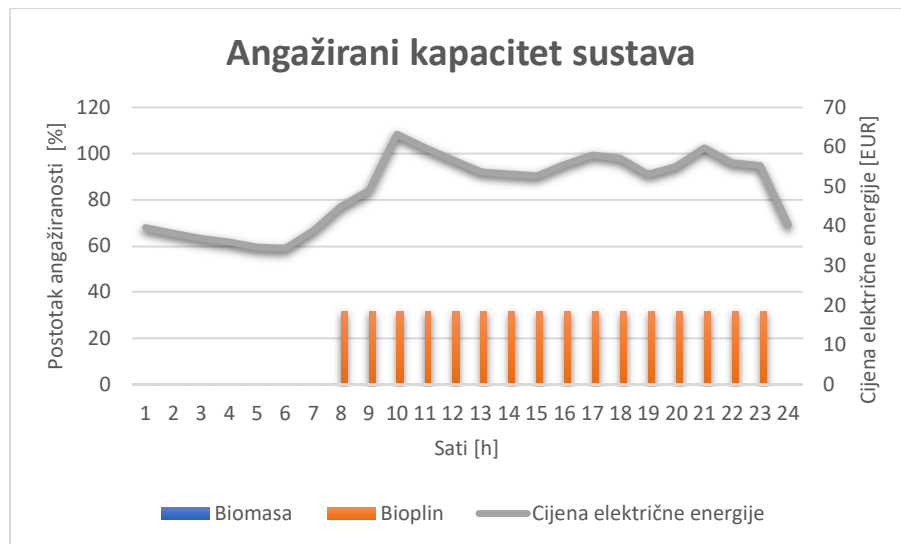
Granični troškovi proizvodnje električne energije β_g su konstantne vrijednosti te su prikazane u tablici 5.4.

Tablica 5.4. *Granični troškovi proizvodnje [6]*

| | Bioplin | Biomasa |
|--|---------|---------|
| Granični troškovi proizvodnje električne energije β_g [EUR/MWh] | 44 | 62 |

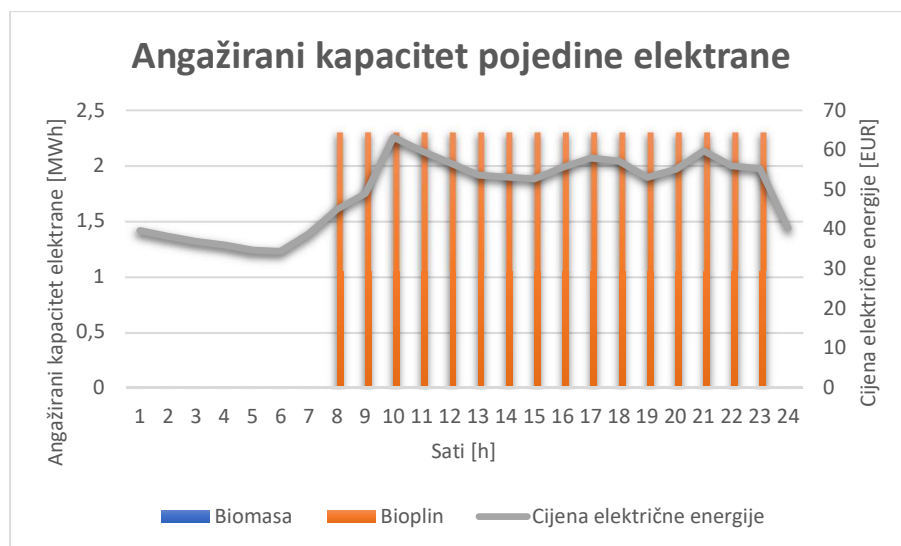
5.2 Simulacija bez poticaja i bilateralnog ugovora

U prvoj simulaciji koristi se primjer kada bilateralni ugovor nije aktivan, niti ima bilo kakvog oblika poticaja. Rezultati simulacije prikazani su tablicama u prilogima 5.1 i 5.2, te u dopunskim tablicama 5.3 i 5.4.



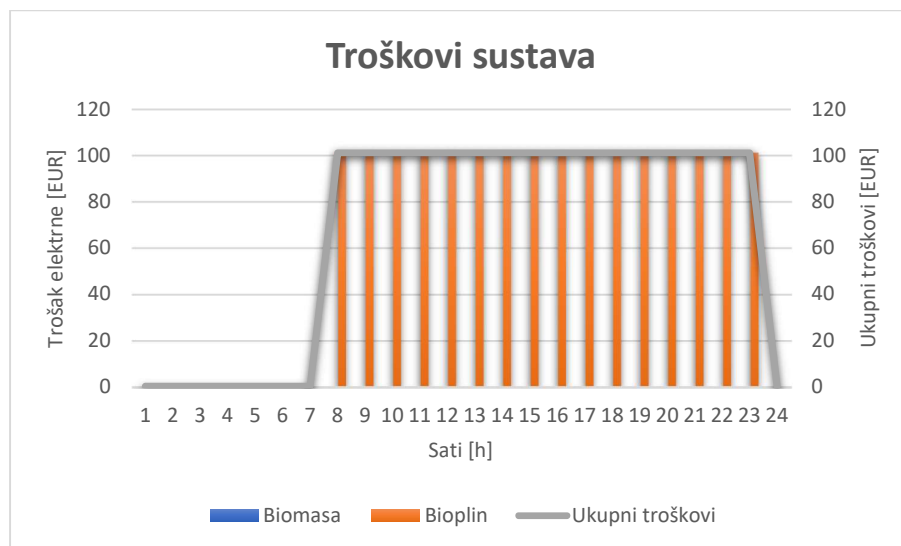
Slika 5.1. Angažirani kapacitet sustava

Iz slike 5.1 primjetno je da u prvih 7 sati elektrana na bioplin ne radi, dok kasnije radi s punim kapacitetom, dok elektrana na biomasu ne radi uopće.



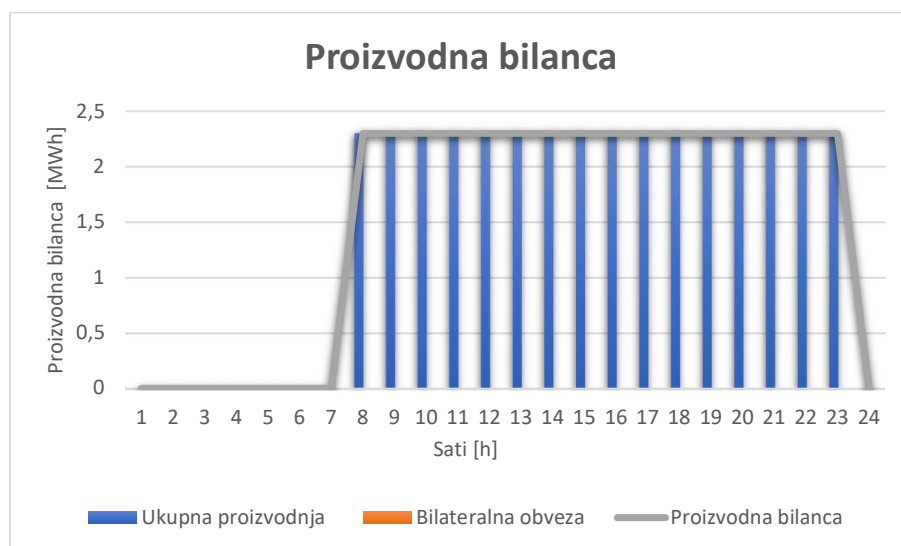
Slika 5.2. Angažirani kapacitet pojedine elektrane

Iz prikaza angažiranih kapaciteta pojedinih elektrana (slika 5.2) vidljivo je kako elektrana na biomasu nije niti radila, jer u ovom slučaju nema poticaja, ni bilateralnog ugovora te nije isplativo da radi s obzirom na cijenu električne energije. Vidljivo je da u prvih 7 sati elektrana na bioplin nije radila, iz razloga što je cijena električne energije niska te je isplativije zaustaviti proizvodnju nego raditi s gubicima.



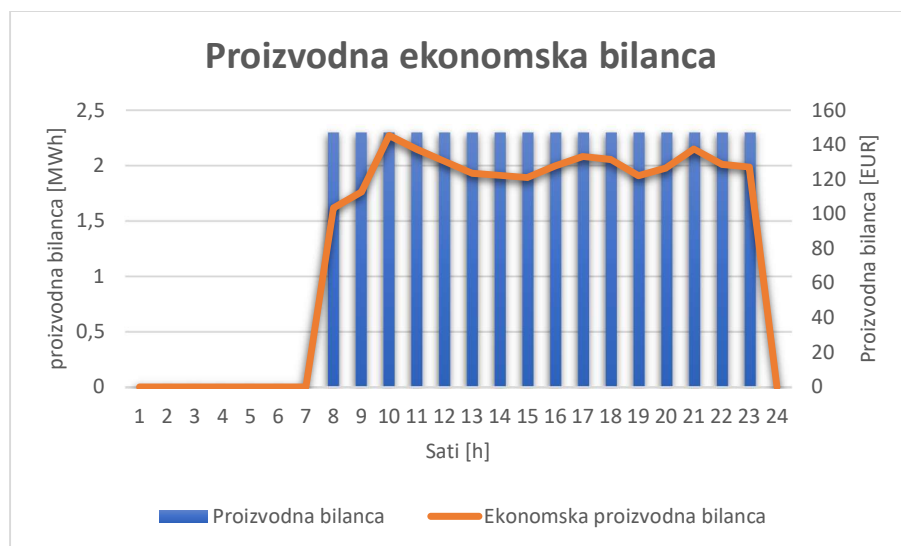
Slika 5.3. *Troškovi sustava*

Prema slici 5.3 da u prvih 7 sati trošak elektrane na bioplin ima vrijednost 0. Razlog tome je što u tim satima elektrana ne radi. Elektrana na biomasu ima trošak 0 zbog toga što nije isplativo da radi. Ostali troškovi odgovaraju graničnim troškovima proizvodnje.



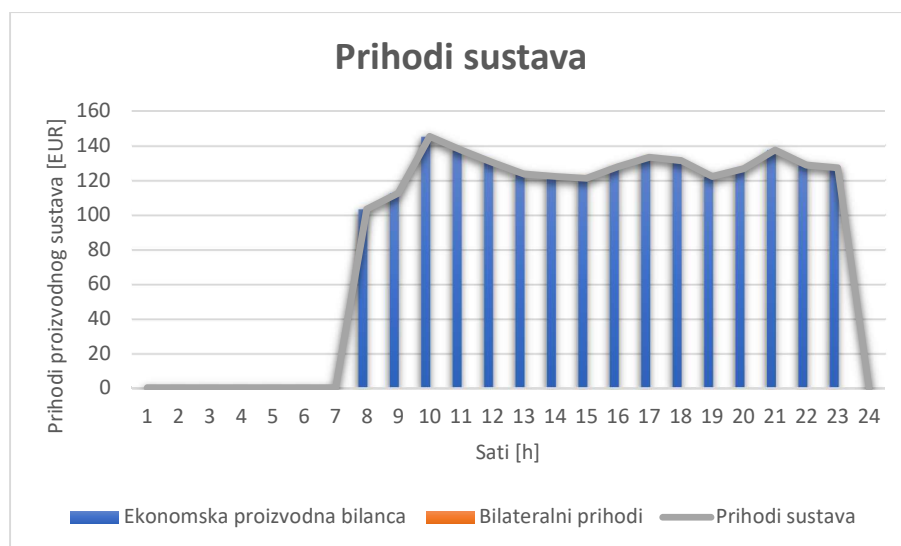
Slika 5.4. *Proizvodna bilanca*

U ovom primjeru simulacije bilateralni ugovor nije aktivan, proizvodna bilanca sustava slika 5.4 predstavlja vrijednost ukupne proizvodnje električne energije proizvodnog sustava u svim satima.



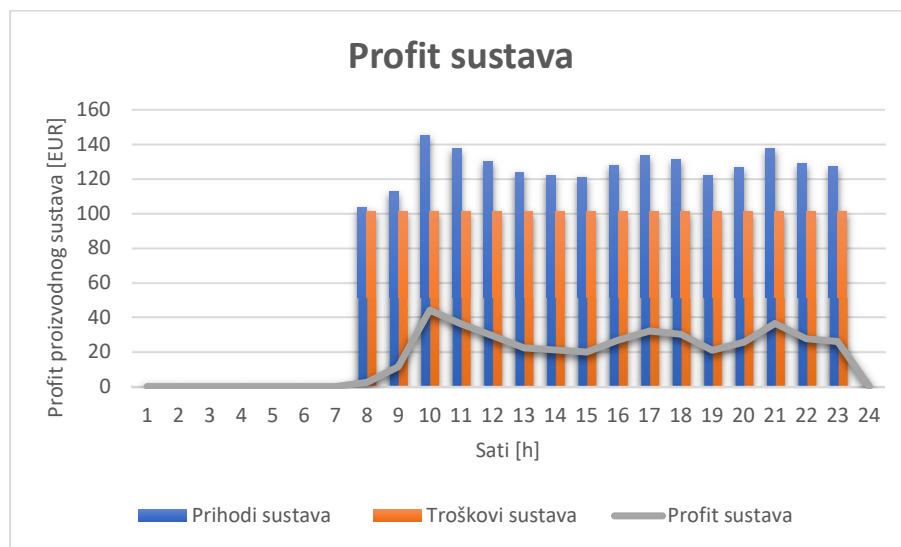
Slika 5.5. Proizvodna ekonomska bilanca

Prema slici 5.5 vidimo se da proizvodnja bilanca ima pozitivne vrijednosti, odnosno imamo samo prihode sustava. Iz razloga što nije aktivan bilateralni ugovor nije potrebno proizvoditi, odnosno kupovati određenu količinu električne energije u svakom satu.



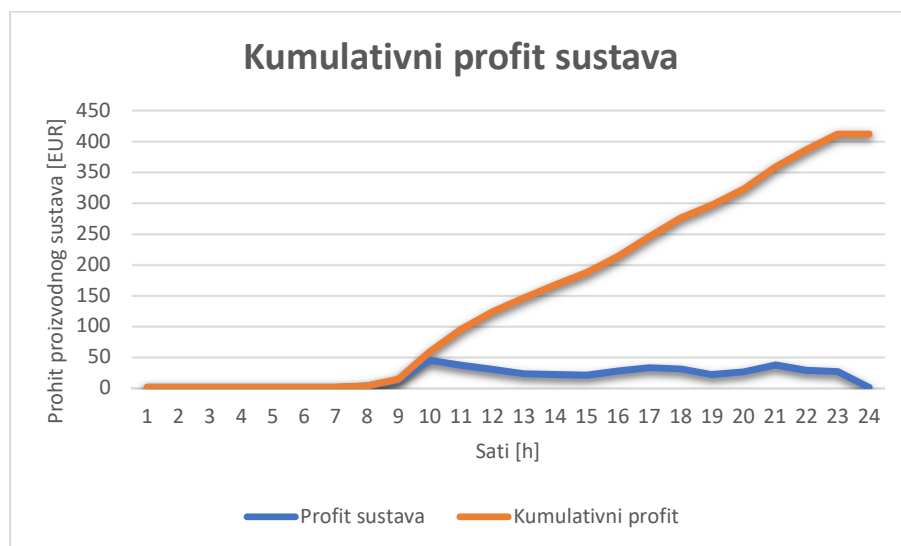
Slika 5.6. Prihodi sustava

U ovom primjeru simulacije bilateralni ugovor nije aktivan, ukupni prihodi proizvodnog sustava prikazanih na slici 5.6 jednaki su kao i proizvodna bilanca u ekonomskom obliku u svim satima simulacije.



Slika 5.7 Profit sustava

Na slici 5.7 vidljivo je da u prvih 7 sati nema profita proizvodnog sustava jer ne radi. Između 3. i 6. sata profit je 0, nije isplativo da elektrana radi. Od 8. sata elektrana ostvaruje profit, do 24. sata kada elektrana ne radi.

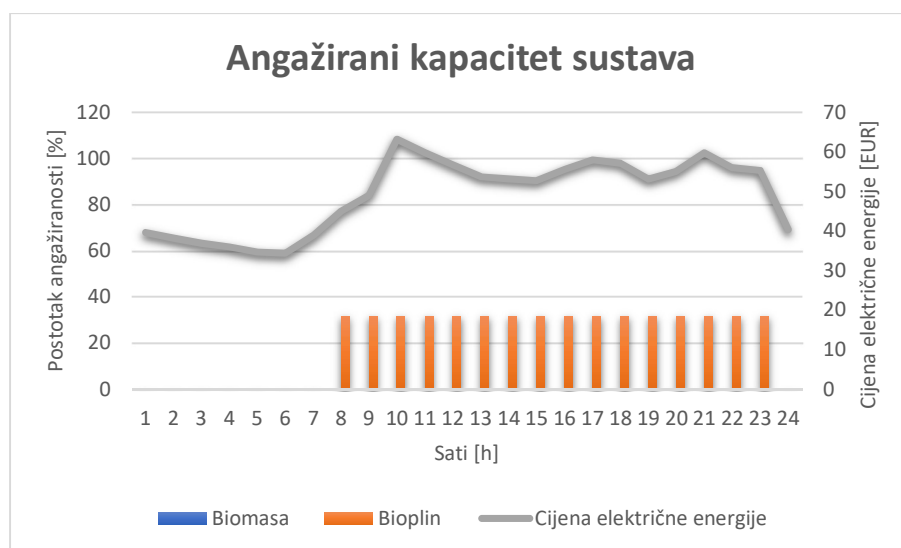


Slika 5.8. Kumulativni profit sustava

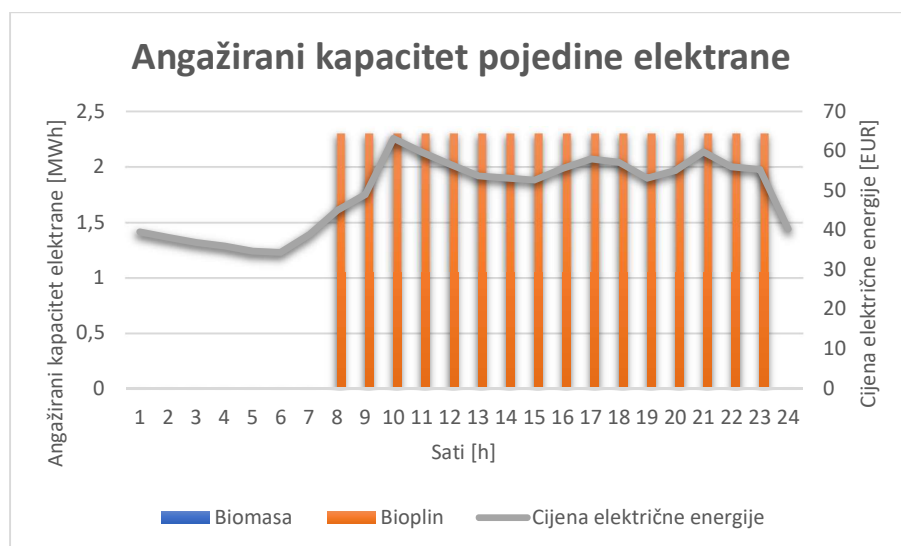
Iz slike 5.8 vidljivo je da u prvih 7 sati nema kumulativnog profita. Od 8. sata dolazi do rasta krivulje kumulativnog profita.

5.3 Simulacija s bilateralnim ugovorom i bez poticaja

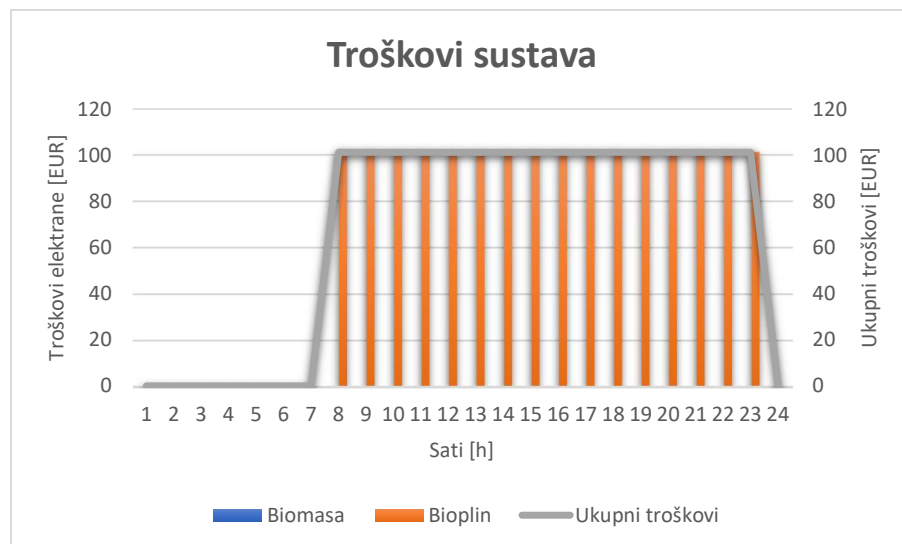
U drugoj simulaciji bilateralni ugovor je aktivan, vrijednost bilateralnog ugovora je 3 MWh u svakom satu s cijenom od 70 [EUR/MWh]. U ovoj simulaciji nema nikakvog oblika poticaja. Rezultati simulacije prikazani su tablicama u priložima 5.5. i 5.6., te u dopunskim tablicama 5.7. i 5.8.



Slika 5.9. Angažirani kapacitet sustava

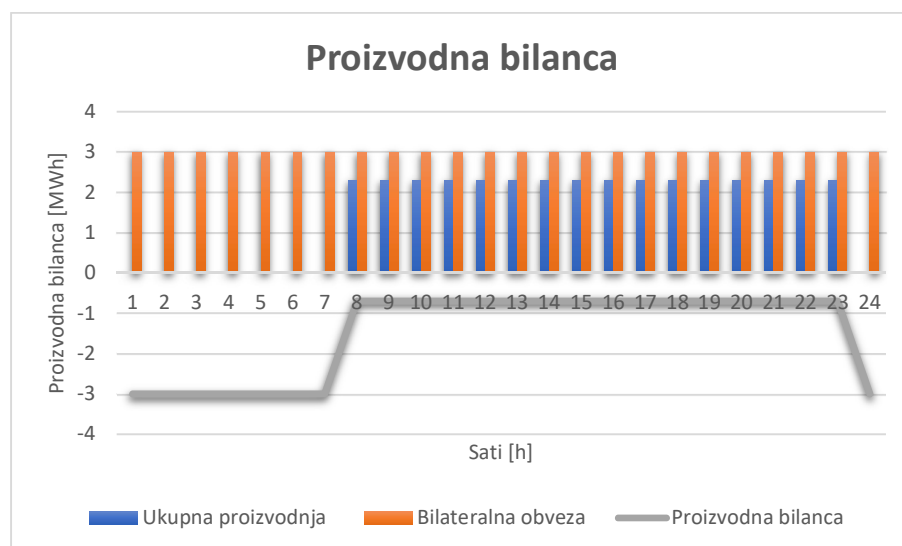


Slika 5.10. Angažirani kapacitet pojedine elektrane



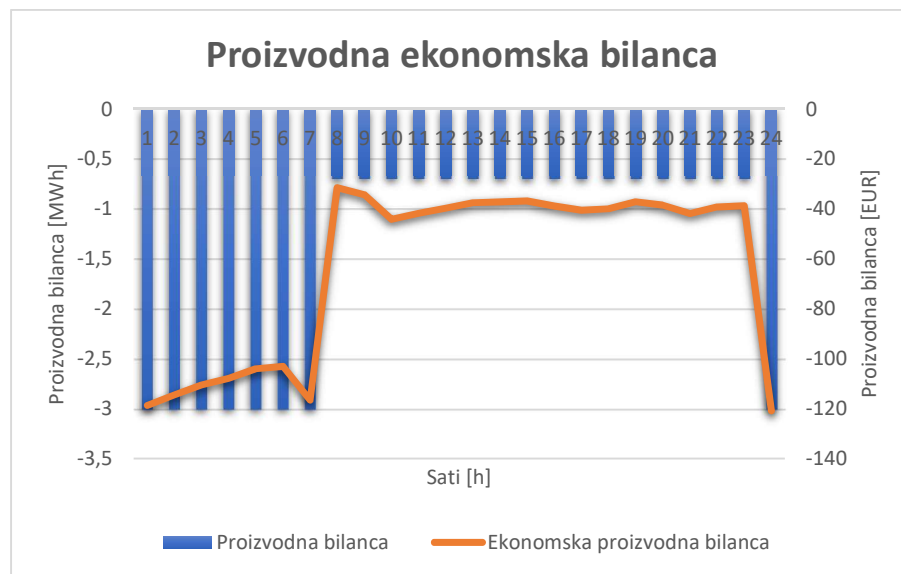
Slika 5.11. *Troškovi sustava*

Iz razloga što je cijena električne energije i dalje manja u odnosu na trošak proizvodnje električne energije kod elektrane na biomasu, ona i dalje ne radi. Provedbom ove simulacije rezultati su jednaki kao u prvoj simulaciji. Slike 5.9., 5.10., 5.11, identične su kao slike 5.1., 5.2., 5.3.



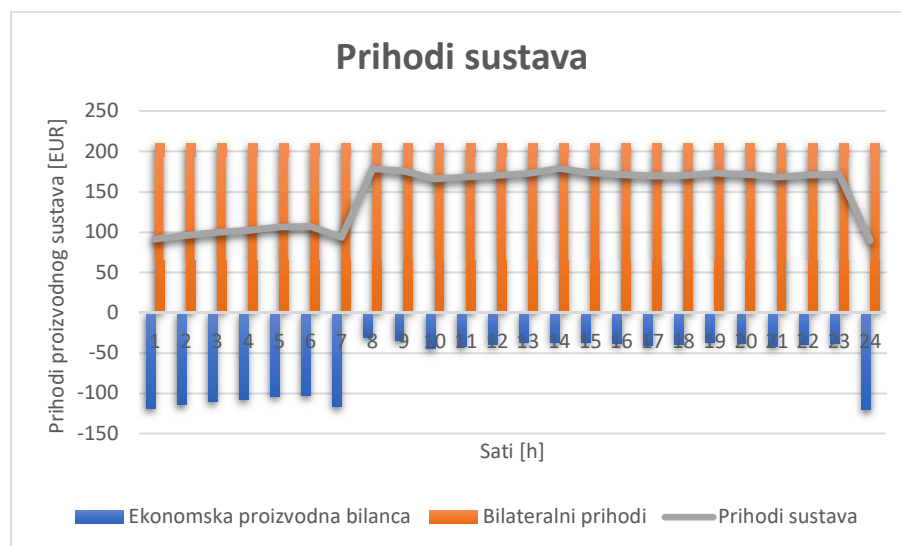
Slika 5.12. *Proizvodna bilanca*

Na slici 5.12. vidljivo je da sustav obavezan isporučiti električnu energiju u iznosu od 3 MWh u svakom satu, zbog aktivnog bilateralnog ugovor. Vidljivo je da zbog niske cijene električne energije elektrane nisu isporučile dovoljnu količinu električne energije, koja je dogovorena bilateralnom ugovorom. Stoga je razliku potrebno nadoknaditi kupnjom električne energije na tržištu.



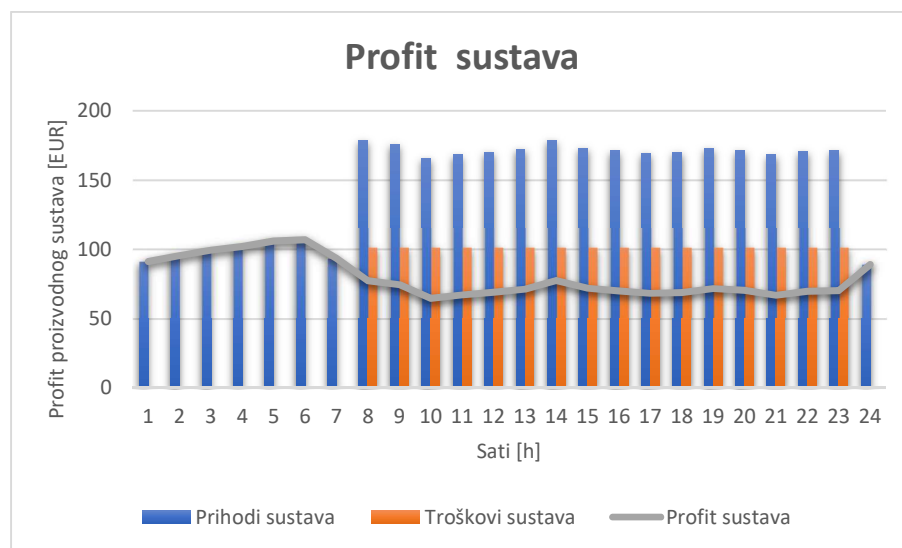
Slika 5.13. Proizvodna ekonomska bilanca

Sa slike 5.13. vidljivo da zbog nedovoljne količine električne energije razlika se mora nadoknaditi kupnjom na tržištu. U ekonomskom smislu to je gubitak u svakom satu, što je i prikazano grafom.



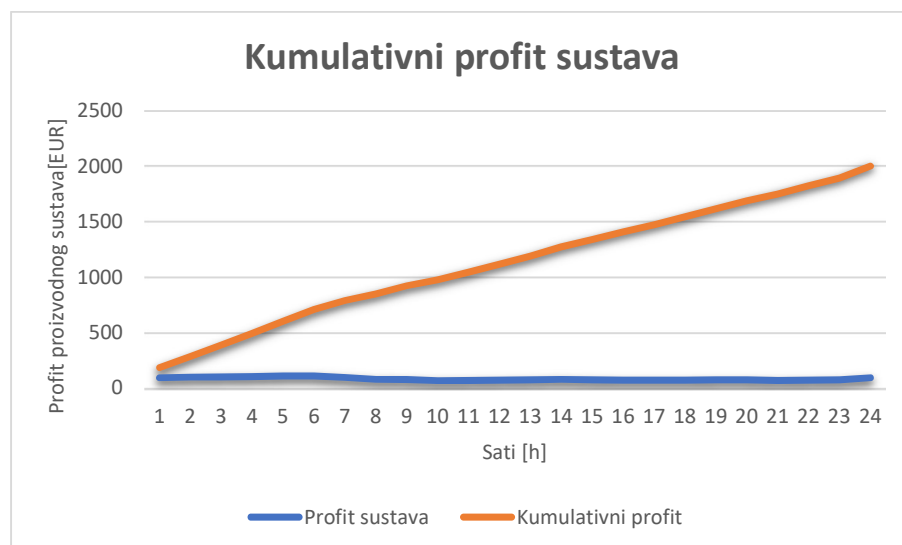
Slika 5.14. Prihodi sustava

Iako je ekonomska bilanca negativna, vidljivo je da su prihodi sustava pozitivno. Razlog tomu je što su prihodi ostvareni bilateralnim ugovorom znatno veći od gubitaka (slika 5.14.). Cijene električne energije su toliko niske da nije isplativo da radi elektrana na biomasu, nego je isplativije kupiti električnu energiju na tržištu i prodati je bilateralnim ugovorom po višoj cijeni.



Slika 5.15. Profit sustava

Na slici 5.15 vidljivo je profit sustava tijekom prvih 7 sati pozitivan zbog bilateralnog ugovora, iako ni jedna elektrana nije bila angažirana.

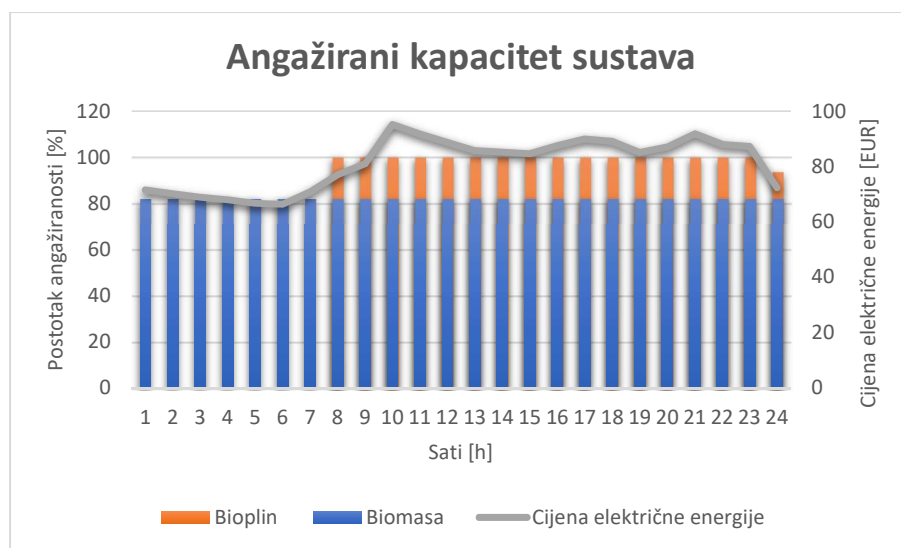


Slika 5.16. Kumulativni profit sustava

Na slici 5.16 vidljiv je rast kumulativnog profita u svakom satu.

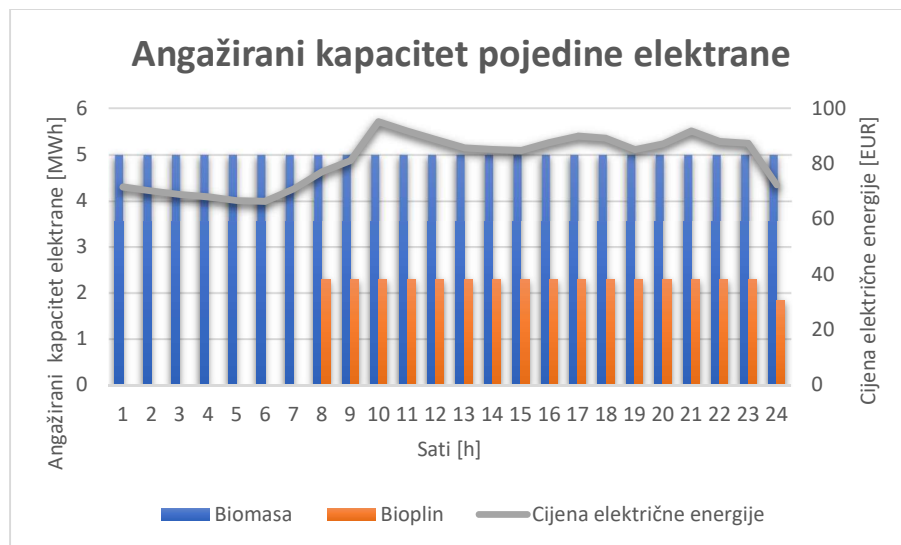
5.4 Simulacija s bilateralnim ugovorom i zajamčenom premijom

U trećoj simulaciji bilateralni ugovor je aktivan, vrijednost bilateralnog ugovora je 3 MWh s cijenom od 70 EUR/MWh. U ovoj simulaciji poticaj je u obliku zajamčene premije i iznosi 32 EUR/MWh. Rezultati simulacije prikazani su tablicama u prilogima 5.9. i 5.10., te u dopunskim tablicama 5.11. i 5.12.



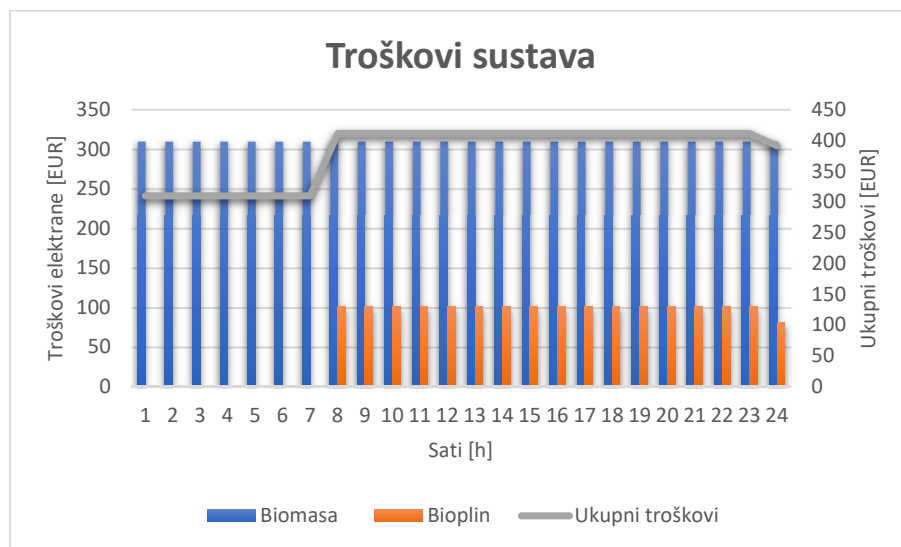
Slika 5.17. Angažirani kapacitet sustava

Iz slike 5.17 kako s porastom cijene električne energije raste i ukupni angažirani proizvodni kapacitet. Vidimo da u prvih 7 sati radi samo elektrana na biomasu.



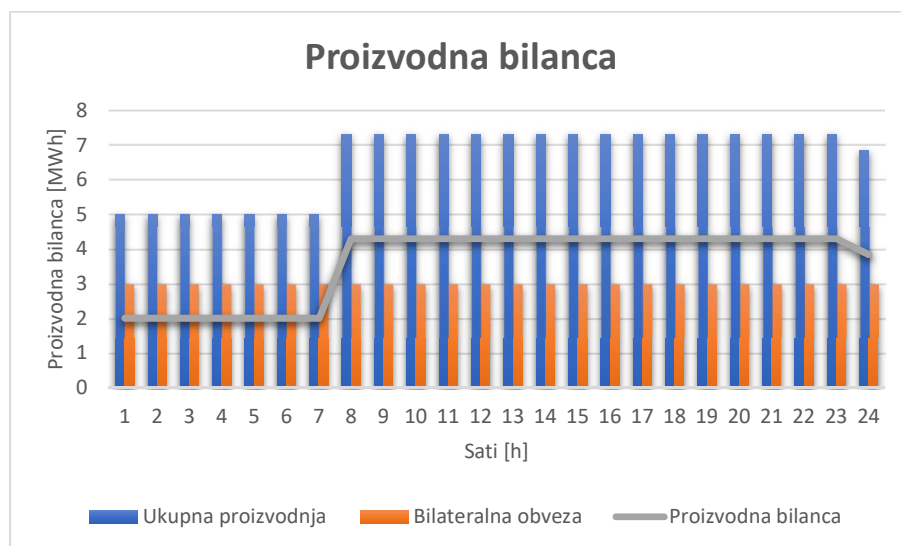
Slika 5.18. Angažirani kapacitet pojedine elektrane

Iz slike 5.18 koja prikazuje angažirani kapacitet pojedine elektrane vidi se da tijekom prvih 7 sati radi samo elektrana na biomasu sa maksimalnim kapacitetom. U 24 satu dolazi do smanjenja angažiranosti elektrane na bioplin



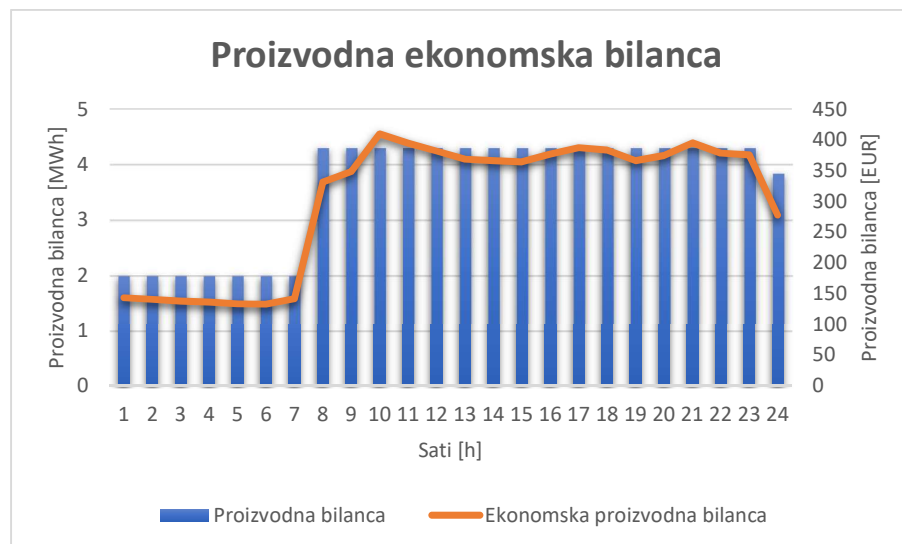
Slika 5.19. *Troškovi sustava*

Iz slike 5.19 vidimo da su u prvih 7 sati troškovi elektrane na bioplin 0 jer nije angažirana, dok u 24 satu dolazi do smanjenja troškova jer se smanjuje kapacitet angažiranosti elektrane na biomasu



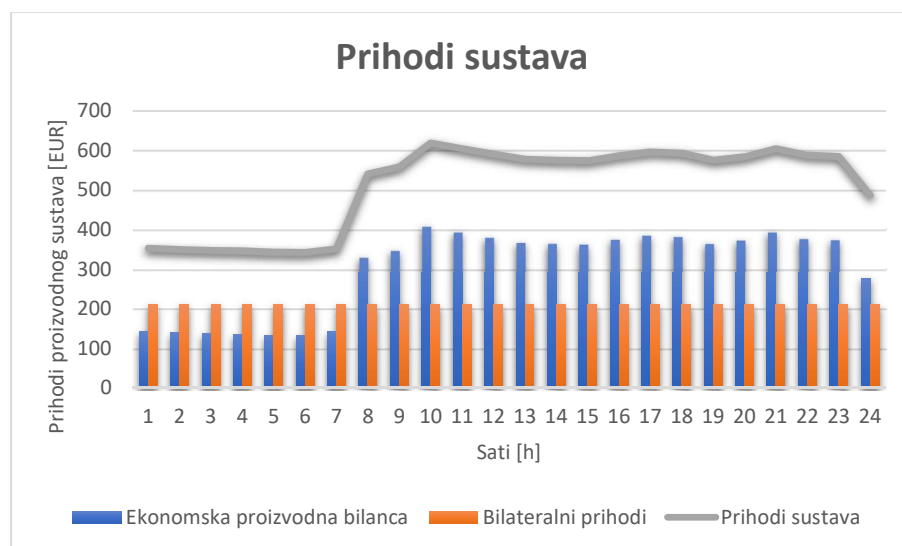
Slika 5.20. *Proizvodna bilanca*

Slike 5.20 je vidljivo da nema potrebe za kupnjom električne energije, elektrane proizvode dovoljno za pokrivanje bilateralnih obveza. Od 8. sata rade obje elektrane s punim kapacitetom.



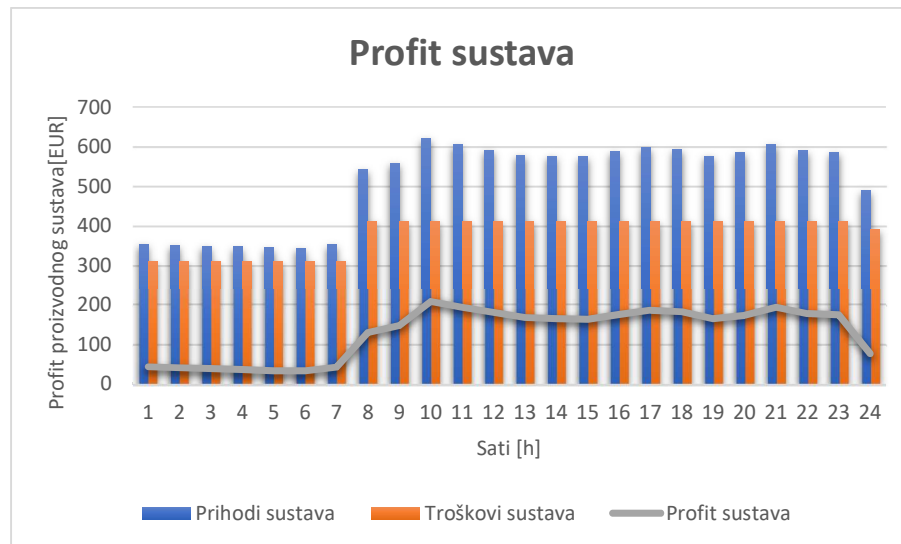
Slika 5.21. *Proizvodna ekonomska bilanca*

Iz proizvodne bilance u ekonomskom obliku slika 5.21 vidljivo je da nema gubitaka, zbog toga što su obje elektrane angažirane.



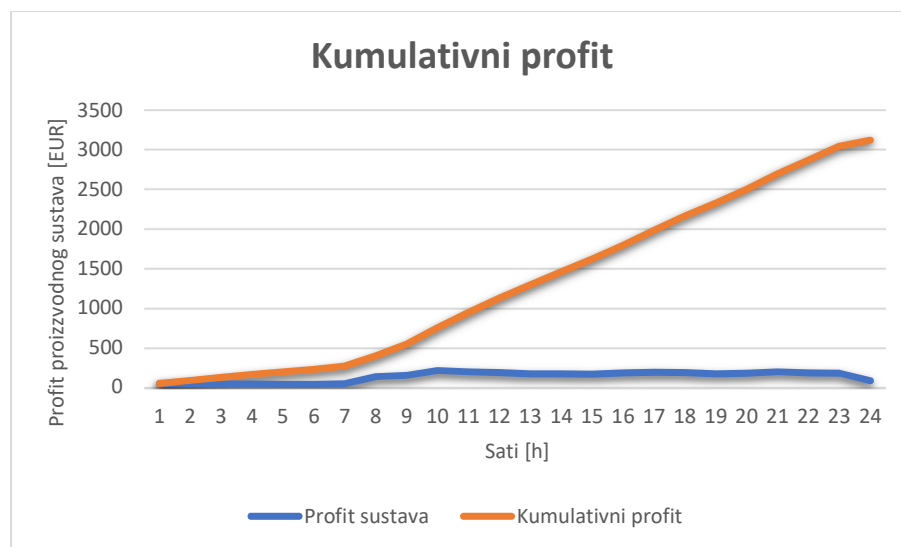
Slika 5.22. *Prihodi sustava*

Sustav kroz cijelo vrijeme ostvaruju profit (slika 5.22.)



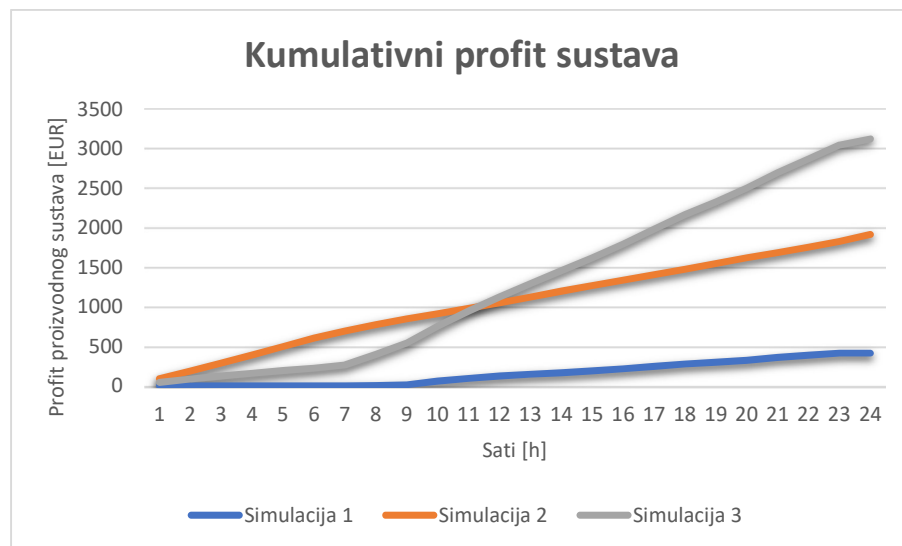
Slika 5.23. *Profit sustava*

Na slici 5.23 vidljivo je da je profit sustava uvijek pozitivan.



Slika 5.24. *Kumulativni profit*

Na slici 5.24. vidljivo je da od 8. sata dolazi do značajnog rasta kumulativnog profita sustava.



Slika 5.24. *Usporedba kumulativnog profit sustava*

Iz slike 5.25. može se vidjeti kako je najmanji kumulativni profit u slučaju prve simulacije, zbog toga što tu nije aktivan ni bilateralni ugovor, niti ima poticaja. Vidimo da je najveći profit u slučaju kada ima poticaja.

6. Zaključak

U ovom radu opisano je tržište električne energije, tipovi tržišta i tržišni ugovori koje je moguće sklopiti te način organizacije slobodnog tržišta. Opisan je i način utvrđivanja cijena na tržištu električne energije. U radu je također dana osnovna podjela elektrane na biomasu, također su opisani i troškovi koji se mogu pojaviti prilikom rada elektrane i sustavi poticaja koji mogu biti dodijeljeni. Dan je pregled matematičkog modela koji se koristi u izradi simulacijskog modela u MATLAB programskom paketu. Provedene su tri simulacije kako bi se mogao analizirati utjecaj bilateralnog ugovora i poticaja na profit sustava.

Analizom rezultata simulacije uočava se utjecaj bilateralnog ugovora i poticaja na optimizaciju. Usporedbom provedenih simulacija uočava se da je najveći kumulativni profit ostvaren u slučaju treće simulacije zbog utjecaja bilateralnog ugovora i poticaja koji se dodjeljuje za obnovljive izvore energije. U prvoj simulaciji je ostvaren najmanji kumulativni profit jer tu nema aktivnog ugovora niti poticaja.

Iz rezultat simulacije vidljivo je kako rad elektrana ne bi bio isplativ bez dodatnih poticaja koje ostvaruju prilikom sudjelovanja na tržištu električne energije.

Literatura

- [1] Kirschen, D.S; Strbac, G. Fundamentals of Power System Economic. John Wiley & Sons,2014
- [2] Zakon o tržištu električne energije, Narodne novine, br. 22/13, 102/15.
- [3] Nikolovski, S; Fekete G;. Knežević i Z. Stanić. Uvod u tržište električne energije. Osijek: ETFOS, 2010.
- [4] Filipović,S; Tanić,G. Izazovi na tržištu električne enrgije. Ekonomski institut,2010
- [5] Hrvatska burza električne energije, dostupno online: <https://www.cropex.hr/hr/> (pristup 07.04.2018.)
- [6] International Renewable Energy Agency, Bimass for Power Generation, 2012, dostupno online: <http://www.irena.org> (pristup 02.05.2018)
- [7] Feed-in Tariffs (FIT), dostupno online: <https://energypedia.info> (pristup 13.5.2018)
- [8] RES LEGAL Europe, dostupno online: <http://www.res-legal.eu> (pristup 13.5.2018)
- [9] Feed-in premium, dostupno online: <https://energypedia.info> (pristup 17.5.2018)
- [10] Zagrebačke otpadne vode, dostupno online: <http://www.zov-zagreb.hr> (pristup 10.07.2018)
- [11] Biomass Power Plants, dostupno online: <http://www.aqylon.com> (pristup 09.07.2018)

Životopis

Ivanković Domagoj rođen je 02.02.1995. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu pohađao je i završio u Vinkovcima. Nakon završene osnovne škole, upisao je tehničku školu u Vinkovcima, smjer elektrotehničar. Nakon završene srednje škole, godine 2013 upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom Fakultet u Osijeku, koji završava u redovnom roku. Godine 2016 upisuje diplomski studij, smjer elektroenergetski sustavi kojeg trenutno pohađa.

Domagoj Ivanković

Sažetak

U radu je opisan mehanizam tržišta električne energije te je izrađen simulacijski model elektrane na biomasu s ciljem određivanja optimalne ponude. U prvom poglavlju dan je uvod u rad. U drugom poglavlju opisano je tržište, te tipovi tržišta i tržišnih ugovora. Također je definiran i način utvrđivanja cijena na tržištu električne energije. Tehnologija elektrane na biomasu i bioplin opisana je u trećem poglavlju, te troškovi i sustavi poticaja. U četvrtom poglavlju dan je matematički model koji služi za izradu simulacijskog modela. Simulacijski model realiziran je u MATLAB programskom paketu. U petom poglavlju prikazani su i kratko objašnjeni rezultati simulacije.

Ključne riječi: tržište, biomasa, bioplin, troškovi, sustavi poticaja, optimizacija, MATLAB, bilateralni ugovori

ABSTRACT

In this paper the mechanism of the electricity market is described and a biomass power plant simulation model is developed to determine the optimal supply. The first chapter describes the introduction to work. The second chapter describes the market, market types and market contracts. Also has been defined the price on the electricity market. Biomass and biogas power plant technology is described in the third chapter, and the costs and incentive systems. In the fourth chapter, a mathematical model is used to create a simulation model. The simulation model is implemented in the MATLAB software package. In the fifth chapter is presented a brief explanation of simulation results.

Keywords: market, biomass, biogas, costs, incentive systems, optimization, MATLAB, bilateral agreement

Prilog

Prilog 5.1. *Tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za prvih dvanaest sati prve simulacije*

| t[h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| $G_{1,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{2,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| p_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| k_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Prilog 5.2. *Tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za drugih dvanaest sati prve simulacije*

| t[h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| $G_{1,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{2,t}$ [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 0 |
| p_t [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 0 |
| k_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Prilog 5.3. *Dopunska tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za prvih dvanaest sati prve simulacije*

| t[h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| $G_{\%1,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{\%2,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 |
| $C_{1,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $C_{2,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 |
| $C_{uk,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 |
| $G_{uk,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| B_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| X_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| XE_t [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103,48 | 112,68 | 145,34 | 137,43 | 130,41 |
| $P_{B,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P_t [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103,48 | 112,68 | 145,34 | 137,43 | 130,41 |
| PR_t [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,28 | 11,48 | 44,14 | 36,23 | 29,21 |
| $PR_{k,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,28 | 13,76 | 57,9 | 94,13 | 123,34 |

Prilog 5.4. *Dopunska tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za drugih dvanaest sati prve simulacije*

| t[h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $G_{\%1,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{\%2,t}$ [%] | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 0 |
| $C_{1,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $C_{12,t}$ [EUR] | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 0 |
| $C_{uk,t}$ [EUR] | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 0 |
| $G_{uk,t}$ [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 0 |
| B_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| X_t [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 0 |
| XE_t [EUR] | 123,51 | 122,25 | 121,16 | 127,86 | 133,33 | 131,45 | 122,11 | 126,68 | 137,54 | 128,8 | 127,19 | 0 |
| $P_{B,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| P_t [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103,48 | 112,68 | 145,34 | 137,43 | 130,41 |
| PR_t [EUR] | 22,31 | 21,05 | 19,96 | 26,66 | 32,13 | 30,25 | 20,91 | 25,48 | 36,34 | 27,6 | 25,99 | 0 |
| $PR_{k,t}$ [EUR] | 145,65 | 166,7 | 186,66 | 213,32 | 245,45 | 275,7 | 296,61 | 322,09 | 358,43 | 386,03 | 412,02 | 412,02 |

Prilog 5.5. *Tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za prvih dvanaest sati druge simulacije*

| t[h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| $G_{1,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{2,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| p_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| k_t [MW] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |

Prilog 5.6. *Tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za drugih dvanaest sati prve simulacije*

| t[h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| $G_{1,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{2,t}$ [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 0 |
| p_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| k_t [MW] | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 3 |

Prilog 5.7. *Dopunska tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za prvih dvanaest sati druge simulacije*

| t[h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|
| $G_{\%1,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{\%2,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 |
| $C_{1,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $C_{2,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 |
| $C_{uk,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 |
| $G_{uk,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| B_t [MW] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| X_t [MW] | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 | -3 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 |
| XE_t [EUR] | -118,77 | -114,51 | -110,61 | -107,91 | -104,01 | -103,11 | -116,61 | -31,49 | -34,29 | -44,23 | -41,83 | -39,69 |
| $P_{B,t}$ [EUR] | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| P_t [EUR] | 91,23 | 95,49 | 99,39 | 102,09 | 105,99 | 106,89 | 93,39 | 178,51 | 175,71 | 165,77 | 168,17 | 170,31 |
| PR_t [EUR] | 91,23 | 95,49 | 99,39 | 102,09 | 105,99 | 106,89 | 93,39 | 77,31 | 74,51 | 64,57 | 66,97 | 69,11 |
| $PR_{k,t}$ [EUR] | 91,23 | 186,72 | 286,11 | 388,2 | 494,19 | 601,08 | 694,47 | 771,78 | 846,29 | 910,86 | 977,83 | 1046,94 |

Prilog 5.8. *Dopunska tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za drugih dvanaest sati druge simulacije*

| t[h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $G_{\%1,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $G_{\%2,t}$ [%] | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 0 |
| $C_{1,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $C_{12,t}$ [EUR] | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 0 |
| $C_{uk,t}$ [EUR] | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 0 |
| $G_{uk,t}$ [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 0 |
| B_t [MW] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| X_t [MW] | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -3 |
| XE_t [EUR] | -37,59 | -37,21 | -36,88 | -38,91 | -40,58 | -40,01 | -37,16 | -38,56 | -41,86 | -39,2 | -38,71 | -120,9 |
| $P_{B,t}$ [EUR] | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| P_t [EUR] | 172,41 | 178,79 | 173,12 | 171,09 | 169,42 | 169,99 | 172,84 | 171,44 | 168,14 | 170,8 | 171,29 | 89,1 |
| PR_t [EUR] | 71,21 | 77,59 | 71,92 | 69,89 | 68,22 | 68,79 | 71,64 | 70,24 | 66,94 | 69,6 | 70,09 | 89,1 |
| $PR_{k,t}$ [EUR] | 1118,15 | 1195,74 | 1267,66 | 1337,55 | 14025,77 | 1474,56 | 1546,2 | 1616,44 | 1683,38 | 1752,98 | 1823,07 | 1912,17 |

Prilog 5.9. Tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za prvih dvanaest sati treće simulacije

| t[h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| $G_{1,t}$ [MW] | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| $G_{2,t}$ [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| p_t [MW] | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 |
| k_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Prilog 5.10. Tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za drugih dvanaest sati treće simulacije

| t[h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $G_{1,t}$ [MW] | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| $G_{2,t}$ [MW] | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 1,84 |
| p_t [MW] | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 3,84 |
| k_t [MW] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Prilog 5.11. Dopunska tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za prvih dvanaest sati treće simulacije

| t[h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $G_{\%1,t}$ [%] | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 |
| $G_{\%2,t}$ [%] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 |
| $C_{1,t}$ [EUR] | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 |
| $C_{2,t}$ [EUR] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 |
| $C_{uk,t}$ [EUR] | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 |
| $G_{uk,t}$ [MW] | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 |
| B_t [MW] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| X_t [MW] | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 |
| XE_t [EUR] | 143,18 | 140,34 | 137,74 | 135,94 | 133,34 | 132,74 | 141,74 | 331,06 | 348,26 | 409,32 | 394,53 | 381,41 |
| $P_{B,t}$ [EUR] | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| P_t [EUR] | 353,18 | 350,34 | 347,74 | 345,94 | 343,34 | 342,74 | 351,74 | 541,06 | 558,26 | 619,32 | 604,53 | 591,41 |
| PR_t [EUR] | 43,18 | 40,34 | 37,94 | 35,94 | 33,34 | 32,74 | 41,74 | 129,86 | 147,06 | 208,12 | 193,33 | 180,21 |
| $PR_{k,t}$ [EUR] | 43,18 | 83,52 | 121,46 | 157,4 | 190,74 | 223,48 | 265,22 | 395,08 | 542,14 | 750,26 | 943,59 | 1123,8 |

Prilog 5.12. *Dopunska tablica sa vrijednostima rezultata optimizacije za drugih dvanaest sati treće simulacije*

| t[h] | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| $G_{\%1,t}$ [%] | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 | 68,49 |
| $G_{\%2,t}$ [%] | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 31,51 | 25,21 |
| $C_{1,t}$ [EUR] | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 | 310 |
| $C_{12,t}$ [EUR] | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 101,2 | 80,94 |
| $C_{uk,t}$ [EUR] | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 411,2 | 390,96 |
| $G_{uk,t}$ [MW] | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 7,3 | 6,84 |
| B_t [MW] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| X_t [MW] | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 3,84 |
| XE_t [EUR] | 368,51 | 366,15 | 364,12 | 376,64 | 386,87 | 383,35 | 365,89 | 374,44 | 394,74 | 378,4 | 375,39 | 277,71 |
| $P_{B,t}$ [EUR] | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 | 210 |
| P_t [EUR] | 578,51 | 576,15 | 574,12 | 586,44 | 596,87 | 593,35 | 575,89 | 584,44 | 604,74 | 588,4 | 585,39 | 587,71 |
| PR_t [EUR] | 167,31 | 164,95 | 162,92 | 175,44 | 185,67 | 182,15 | 164,69 | 173,24 | 193,54 | 177,2 | 174,19 | 76,51 |
| $PR_{k,t}$ [EUR] | 1291,11 | 1456,06 | 1618,98 | 1794,42 | 1980,09 | 2162,24 | 2326,93 | 2500,17 | 2693,71 | 2870,91 | 3045,1 | 3121,61 |